

LA VIDA EN UN MUNDO CONECTADO | CONSUMO DE AGUAS RESIDUALES | CULTURA EN TEOTIHUACÁN

SEPTIEMBRE 2014 N.º 456

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2014 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SOSTENIBILIDAD
Consumo humano de aguas residuales

ARQUEOLOGÍA
La antigua cultura de Teotihuacán

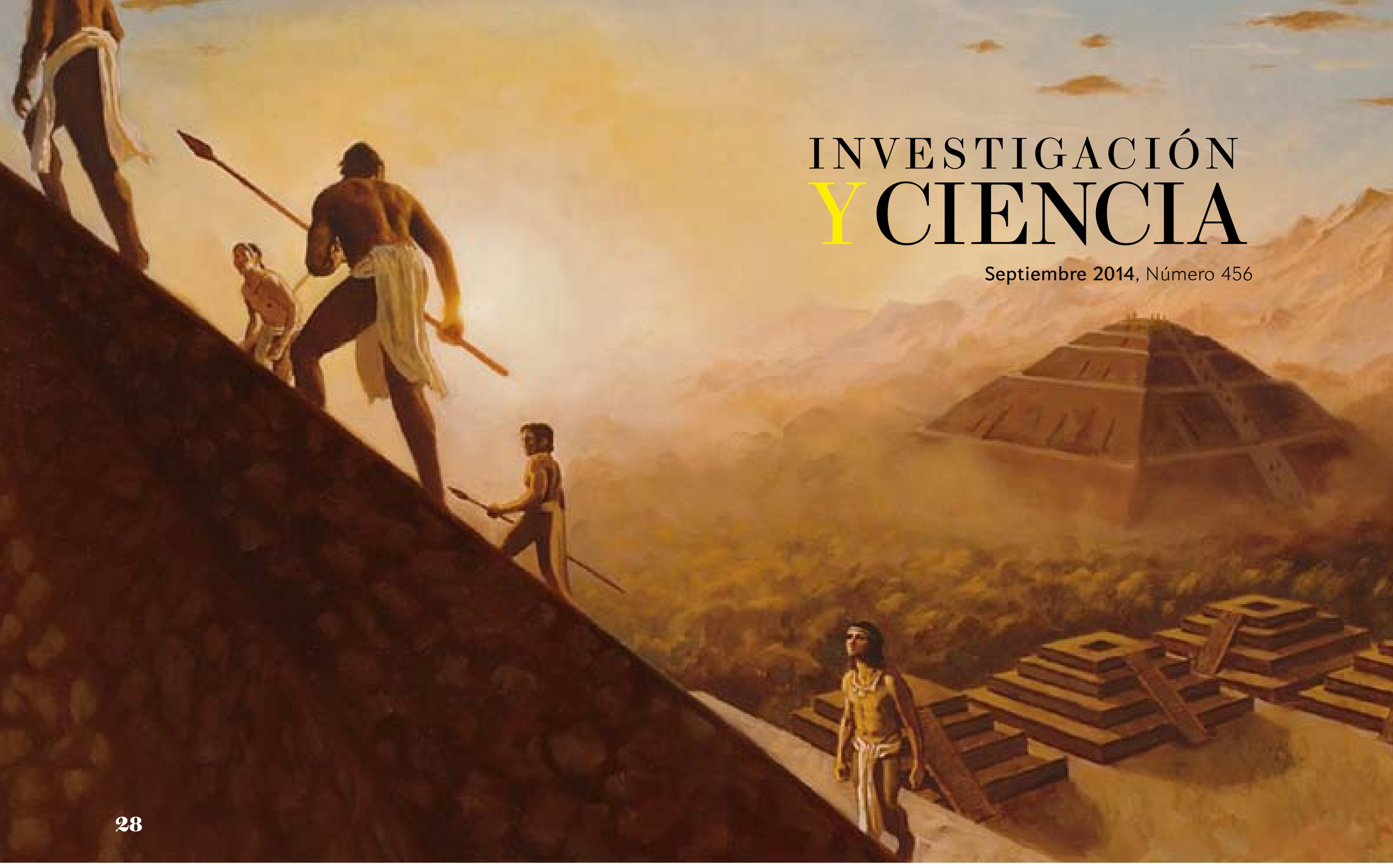
ASTROFÍSICA
Burbujas gigantes en la Vía Láctea

La vida en un mundo conectado

Las redes globales de sensores abren nuevos caminos hacia la percepción extrasensorial

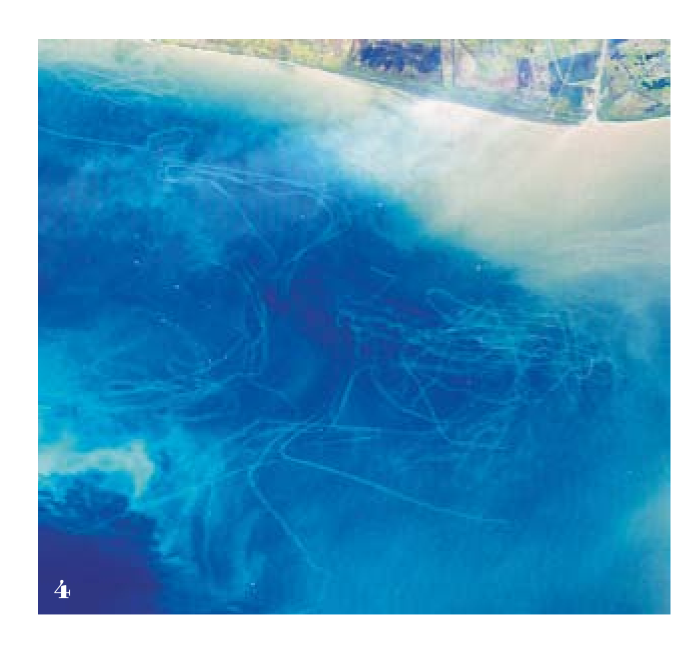


6,50 EUROS


INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Septiembre 2014, Número 456
28

BERNARD LEE

ARTÍCULOS







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

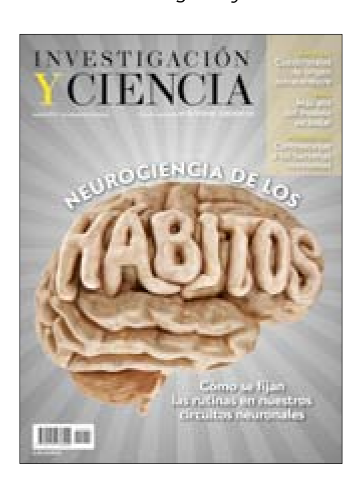
SECCIONES

EN PORTADA

Vivimos rodeados de sensores de todo tipo: giróscopos, cámaras, micrófonos, acelerómetros... Con todo, los datos así generados suelen permanecer confinados en un único dispositivo y se emplean solo para un fin específico. Una futura red de sensores interconectados que cruzase la información y la hiciese accesible a cualquier aparato cambiaría para siempre nuestra noción de presencia y la manera en que percibimos el mundo. Imagen de André Kutscherauer.



redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto 2014

¿JAQUE MATE?

En «¿Por qué las buenas ideas bloquean otras mejores?» [por Merim Bilalić y Peter McLeod; Investigación y Ciencia, mayo de 2014], los autores ilustran con una partida de ajedrez lo difícil que resulta dejar de lado una solución ya conocida y prestar atención a otras más eficientes. En la posición analizada, las blancas pueden ganar mediante la popular secuencia de cinco movimientos conocida como «mate de la coz» y, supuestamente, también mediante una combinación de tres jugadas. Sin embargo, esta última es artificiosa: la respuesta natural de las negras al segundo movimiento de las blancas nunca sería desplazar su torre a d7, sino capturar la dama blanca con el peón en g7.

Andy Prevelig
Tallahassee, Maryland

Responden los autores: *Hemos recibido varias cartas con la misma objeción. La variante aludida en el artículo implica colocar la dama blanca en una casilla (h6) en la que aparentemente puede ser capturada por el peón negro en g7. Sin embargo, dicha captura es impracticable, ya que dejaría al rey negro expuesto al alfil blanco situado en la otra punta del tablero, en b2. En otras palabras, el peón negro está clavado, por lo que no puede tomar la dama.*

En nuestro artículo descartamos indicar explícitamente por qué las negras no pueden capturar la dama en h6. Pero, tal y como parecen indicar todas las cartas recibidas, ¡esa omisión ha servido para reforzar la idea principal de nuestro trabajo! Una vez que nuestro cerebro se hace con una idea de cómo deberían funcionar las cosas, resulta sumamente difícil concebir otras maneras de afrontar la situación, con independencia de cuán obvias puedan ser estas para otras personas.

METABOLISMO EN MARTE

En «Nuevas técnicas para buscar vida en Marte» [por Christopher P. McKay y Víctor Parro García; Investigación y Ciencia, agosto de 2014], tras una breve introducción crítica sobre las investigaciones llevadas a cabo hasta ahora, los autores se plantean cuáles serian los enfoques más modernos para conseguir encontrar trazas de vida en el planeta vecino.

El artículo propone que una misión adecuada debería incluir un detector de ADN, un microchip para inmunoensayos y un dispositivo para detectar y caracterizar aminoácidos. Sin embargo, la mayoría de las definiciones operativas de vida se basan en los conceptos de metabolismo y replicación, por lo que llama poderosamente la atención que una futura misión para descubrir vida presente o pasada en Marte no contemple la medición de tales procesos. ¿No piensan los autores que, aunque es importantísimo descubrir las piezas de la vida, lo sería mucho más verificar un metabolismo primitivo o huellas de replicación molecular?

Felipe Ojeda
Departamento de obstetricia y ginecología
Hospital General de Granollers
y Universidad Internacional de Cataluña

Responde Parro: *Se trata de una pregunta muy pertinente y que está en la mente de muchos astrobiólogos interesados en saber si hay o hubo vida en Marte.*

De hecho, lo que plantea el lector ya se hizo con los experimentos de las sondas Viking. *Bien es cierto que hoy en día sabemos mucho más acerca de posibles metabolismos microbianos gracias a nuestra experiencia con los microorganismos extremófilos. Una vez conocida la geoquímica de un lugar, podríamos inferir posibles metabolismos microbianos, diseñar medios de cultivo apropiados para enriquecerlos y acoplar sistemas de medición de ciertas actividades metabólicas, como la producción de metano (por metanógenos), de SH_2 (por bacterias sulfato-reductoras), etcétera.*

Sin embargo, no es fácil, ni aun en tierra, conseguir cultivos de enriquecimiento en este tipo de metabolismos. Hoy en día solo somos capaces de cultivar el 1 por ciento de los microorganismos, ya sea porque desconocemos los requerimientos nutricionales del resto o porque muchos de ellos viven acoplados al metabolismo de otros (un proceso conocido como sintrofía). De acuerdo con nuestra experiencia, observar una actividad determinada en muestras geológicas con baja densidad microbiana podría llegar a tardar meses o incluso años.

Los órganos de decisión de la NASA están muy sensibilizados frente a la posibilidad de que tales experimentos no proporcionen ningún tipo de información. Por esta razón se prefieren mediciones espectroscópicas, las cuales siempre rinden un espectro de elementos que pueden analizarse —si bien, por desgracia, poco concluyentes en lo que se refiere a la presencia de vida.

Dicho esto, el enfoque que proponemos en el artículo incluye, aunque de forma indirecta, los conceptos de metabolismo y replicación: la detección de biomoléculas complejas como péptidos, fragmentos de ácidos nucleicos o polisacáridos complejos estaría indicando, de algún modo, la existencia de productos de un metabolismo complejo y con información genética.

Pensamos que, si en Marte hubo vida en el pasado o si la hay en el presente, será más probable encontrar restos moleculares asociados a minerales (que les proporcionan protección) que células vivas cuyo metabolismo pueda amplificarse. No obstante, deseamos insistir en que la propuesta del lector es considerada por varios científicos; solo es cuestión de diseñar el experimento apropiado.

Errata corrige

En el artículo **Aportaciones de la cristalografía a la medicina** [Investigación y Ciencia, julio de 2014], en la breve descripción de la mioglobina de la página 12, debe sustituirse «en la sangre» por «en los músculos».

En el apunte **Un hito en el largo y sinuoso camino hacia la fusión nuclear** [Investigación y Ciencia, agosto de 2014], en el último párrafo debe sustituirse «un brote de unos 500 billones de julios» por «un brote de al menos 190 millones de julios».

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



SURCOS dejados por el arrastre de fondo en el golfo de México.

BIODIVERSIDAD

El fondo esquilmado

Los barcos de pesca han arrastrado las redes por el fondo marino en busca de peces y crustáceos bentónicos desde la Edad Media. En los últimos decenios, las flotas pesqueras a motor calan redes cada vez mayores en zonas más profundas y más alejadas de la costa, con el apoyo de las subvenciones oficiales. El valor declarado de las capturas en aguas internacionales durante 2010 supera los 600 millones de dólares.

A fin de comprobar la transformación del lecho marino provocada por el arrastre de fondo, un equipo dirigido por Antonio Pusceddu, de la Universidad Politécnica de las Marcas de Ancona (Italia), tomó muestras de sedimento marino en zonas explotadas e intactas frente a la costa nordeste de España, entre 500 y 2000 metros de profundidad. Los investigadores (entre ellos Jacobo Martín, Pere Puig y Albert Palanques, del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC en Barcelona, y Pere Masqué, del Instituto de Ciencia y Tecnología Ambientales de la Universidad Autónoma de Barcelona) contabilizaron el número de especies y de especímenes presentes en las muestras y cuantificaron el contenido de carbono del sedimento.

El recuento final resultó desalentador: el arrastre de fondo ha reducido la biodiversidad un 50 por ciento y la materia orgánica un 52 por ciento respecto a los lugares sin explotar. Asimismo, ha ralentizado el ciclo del carbono un 37 por ciento. El carbono extraviado no permanece fijo en el lecho marino y acaba acidificando el agua o disuelto en la atmósfera. Las conclusiones se publicaron el pasado junio en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

A pesar de las imágenes transmitidas por los sumergibles de un fantasmagórico polvo blanco depositado sobre el fondo arenoso, Pusceddu asegura que los abismos marinos no son desiertos. Tal vez no alberguen corales fabulosos ni escarpadas montañas submarinas pero acogen formas de vida tan diminutas como necesarias. Algunas constituyen el sustento de las gambas, que son la captura más codiciada por los arrastreros en la zona de estudio, mientras que otras mantienen el carbono fijado en el fondo marino.

Los peces bentónicos de las aguas británicas capturan cada año una cantidad de dióxido de carbono equivalente a un millón de toneladas métricas, según un estudio publicado en junio en *Proceedings of the Royal Society B*. Si ese proceso de fijación biológica se mantuviera intacto podría ayudar a los países a compensar las emisiones de carbono, afirman los autores.

La mejora de la gestión es apremiante: la creciente potencia de los arrastreros les permite faenar en aguas cada vez más profundas, las prospecciones petrolíferas están alcanzando profundidades abisales y Papúa Nueva Guinea acaba de firmar el primer acuerdo comercial de minería submarina. Además, otras investigaciones confirman que la fauna abisal tiene una gran longevidad y se recupera con suma lentitud de los estragos del arrastre de fondo. La Unión Europea podría dar el primer paso. El recién electo Parlamento Europeo está revisando el proyecto de ley para limitar la envergadura del arrastre a gran profundidad. Elliott Norse, director científico del Instituto de Conservación Marina de Seattle, afirma que los últimos datos hacen patente a los órganos de decisión la necesidad de reducir el impacto ambiental de la pesca.

—Lucas Laursen

COGNICIÓN

El pensador

Cuando no sabemos la respuesta a una pregunta, pongamos a la pista de un crucigrama, somos conscientes de nuestra limitación y concebimos una estrategia para descubrir la información ignorada. Esa consciencia sobre nuestro propio conocimiento (pensar sobre el pensamiento) se denomina metacognición. Resulta difícil saber si los animales comparten esta capacidad porque no podemos preguntárselo y, hasta la fecha, los estudios en primates y aves no han podido descartar explicaciones más sencillas para este complejo proceso.

Sabemos, en cambio, que ciertos animales planifican el futuro. Uno de ellos es la chara californiana, un córvido originario del oeste de Norteamérica. La chara es uno de los modelos preferidos por los expertos en cognición porque no se queda «estancada en el tiempo»; es capaz de recordar el pasado y hacer acopio de alimento para burlar el hambre, explica Arii Watanabe, psicóloga de la Universidad de Cambridge. Pero la pregunta persiste: ¿es consciente de que está planificando?

Watanabe ideó un método para comprobarlo. Dejó que cinco charas vieran cómo dos investigadores escondían comida, en este caso orugas de mariposa. El primero las ocultó en un cuenco entre una serie de cuatro colocados frente a él. El segundo tenía tres cuencos tapados, por lo que solo podía depositarlas en el cuenco abierto. El truco radica en que los investigadores las ocultaron al unísono obligando a las aves a fijar la mirada en uno de ellos.

Watanabe supuso que si las charas tienen metacognición les resultaría más sencillo hallar la comida en el segundo caso: por fuerza la oruga debía estar en el único cuenco abierto. Así que, en lugar de mirar al segundo investigador observarían atentamente la fila de cuatro cuencos abiertos, porque saber en cuál de ellos estaba la oruga sería más útil en el futuro. Y eso es justamente lo que sucedió: las charas observaron al primer investigador más tiempo. Los resultados aparecen en el número de julio de *Animal Cognition*.



Friederike Hillemann, experta en córvidos de la Universidad de Gotinga, opina que el experimento ofrece una demostración elegante de la capacidad de razonamiento de estas aves sobre los propios estados de conocimiento. Pese a no poner directamente a prueba la consciencia, los resultados del experimento son fascinantes porque aportan nuevas pruebas que destronan al hombre como único animal capaz de reflexionar sobre su pensamiento.

—Jason G. Goldman

CONSERVACIÓN

Control descendente

Los biólogos creen desde hace tiempo que las pequeñas alimañas heredarán la Tierra cuando los grandes mamíferos como los elefantes y las gacelas desaparezcan. Pero a medida que se multipliquen —pensemos en los roedores—, también lo hará el número de pulgas transmisoras de enfermedades. Ahora contamos con la confirmación experimental de esa situación hipotética, preocupante porque podría aumentar la transmisión de enfermedades de los animales al hombre.

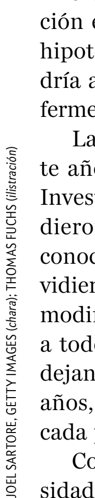
La investigación comenzó hace veinte años, cuando biólogos del Centro de Investigación de Mpala en Kenia emprendieron un experimento a gran escala para conocer la importancia de la diversidad. Dividieron la superficie del centro en parcelas de 4 hectáreas y modificaron la fauna residente en ellas: en algunas trasladaron a todos los grandes mamíferos, como las jirafas y las cebras, dejando solo los menores de 15 kilogramos. Con el paso de los años, mantuvieron un registro de las especies que poblaban cada parcela de sabana.

Con esos registros, Hillary S. Young, ecóloga de la Universidad de California en Santa Bárbara, comparó la abundancia de roedores en las parcelas deshabitadas por grandes mamíferos y en las de libre acceso. El equipo de Young descubrió que los parajes sin megafauna albergaban el doble de roedores que las zonas sin restricciones de acceso. Los resultados aparecieron en el número de mayo de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

De las 11 especies de mamíferos que poblaban los terrenos sin megafauna, el ratón con abazones de Mearns era la más numerosa, con el 75 por ciento del número total. Como era de prever, las posibilidades de hallar una pulga portadora de la bacteria *Bartonella* también se doblaron. *Bartonella* infecta a los mamíferos y al hombre, y puede causar graves daños orgánicos.

Young advierte que los cambios en las comunidades faunísticas repercuten notablemente en el riesgo de transmisión de enfermedades. Y añade que los resultados son extrapolables a cualquier lugar, no solo a la sabana africana. Si la gente es consciente de que la conservación de la fauna ayuda a conservar la propia salud, tal vez no tolere tanto la pérdida de biodiversidad.

—Jason G. Goldman



BIOMECÁNICA

Tecnología inspirada en los pterosaurios

El paleontólogo Michael Habib estudia la biomecánica de los pterosaurios, el mayor de los cuales (de 250 kilogramos y 10 metros de envergadura) tenía el tamaño de un reactor de caza moderno. Los mayores animales voladores que han existido jamás poseían una anatomía de vuelo peculiar, distinta de la de las aves y los murciélagos. Y eso los convierte en un modelo singular de la mecánica de vuelo, sobre todo para los aeroplanos de gran tamaño.

Habib combina los principios de la física y de la anatomía vertebrada con los datos paleontológicos para modelar el vuelo de los pterosaurios. Espera que estos conocimientos inspiren nuevos diseños aeronáuticos y técnicas para instituciones como la NASA y el Departamento de Defensa —ya ha sido así en algunos casos—. En cierto sentido los ha devuelto a la vida. A continuación se muestran algunas de las posibles aplicaciones inspiradas en estos reptiles.

—*Annie Sneed*

Sistemas de lanzamiento rápido

A diferencia de los aeroplanos modernos, los pterosaurios no necesitaban pistas de despegue. Dominaban el despegue vertical, una gesta imposible o costosísima en combustible para los aviones actuales. La osamenta rígida pero hueca y liviana les permitía saltar con fuerza con las cuatro extremidades (alas y pies). Así podían alcanzar mayor velocidad en un tramo corto para alzar el vuelo. Habib está negociando con el Departamento de Defensa una subvención de la Agencia de Proyectos Avanzados para diseñar una aeronave con características físicas análogas y un sistema de lanzamiento cuadrúpedo que permitiría a los pilotos ejecutar un rápido despegue vertical o hacerlo con poco combustible.

Anhanguera santanae

Robot volador marciano

Las astronaves al uso tendrían que viajar con una velocidad vertiginosa para permanecer suspendidas en la tenue atmósfera marciana, lo que haría impracticable la exploración del terreno. Un robot que volara como un pterosaurio pero con un batido rápido y un cuerpo de movimientos lentos podría ser una buena solución. Colibríes y abejorros vuelan de ese modo y la NASA ha diseñado robots inspirados en la biomecánica de estos «aleteadores» natos.

Jeholopterus ninchengensis

Quetzalcoatlus northropi

Rhamphorhynchus muensteri

Alas con adaptación de forma

Las alas de los pterosaurios estaban dotadas de un largo dedo aguzado que alcanzaba dos metros y medio en las especies más voluminosas. Al alzar el vuelo, los dedos se curvaban por la fuerza del batido descendente y volvían a su posición de partida como un muelle con el batido ascendente. El retorno espontáneo ahorraba una cantidad de energía considerable durante el aleteo. Habib afirma que los expertos en robótica de la Fuerza Aérea de EE.UU. están interesados en las alas con adaptación de forma porque podrían resultar útiles como sistemas de vuelo en aviones o en paracaídas —una suerte de alas del alta convexidad.

Carpas sin flameo

Para volar, los pterosaurios mantenían una tensión uniforme en toda la superficie de las alas. Estas eran membranosas y estaban formadas por fibras gruesas y largas entrecruzadas con fibras más pequeñas que controlaban el flameo. Cada fibra se movía de forma independiente bajo la fuerte presión del aire, pero en virtud de sus dimensiones distintas vibraban con frecuencias opuestas que, sumadas, se anulaban, permitiendo que el ala permaneciera firme. Habib quiere ofrecer a varios fabricantes un diseño de tela para carpas que aprovecha el mismo principio físico para reducir el ruidoso flameo y mejorar la estabilidad en condiciones de viento fuerte.

STEPHANIE ABRAMOWICZ (*pterosaurios*)



NUEVAS ESTRELLAS se gestan en los Pilares de la Creación.

ASTRONOMÍA

Los Pilares de la Creación

¿Se acuerda de los Pilares de la Creación? Desde que el Telescopio Espacial Hubble tomó esa espectacular fotografía en 1995, la hemos visto en carteles, camisetas y salvapantallas. Sin embargo, aunque parece que a nadie le son desconocidos, no están claros los detalles de cómo se formaron. Una simulación por ordenador quizás haya despejado por fin el misterio. Scott Balfour, astrónomo de la Universidad de Cardiff, y sus colaboradores han reproducido casi con toda exactitud los Pilares valiéndose de la física de fluidos gaseosos.

A estas tres columnas de gas, situadas en una nebulosa de la Vía Láctea, la del Águila, se les dio su apodo porque crean estrellas. Los pilares mismos son obra de una gran estrella de tipo O cercana, que esculpe el gas con sus potentes vientos. Las estrellas de tipo O son las mayores y más calientes del universo. En su breve vida perturban mucho sus alrededores. Con su intensa radiación calientan el gas que las rodea, donde se forman entonces burbujas expansivas. Según la nueva simulación, que cubre 1,6 millones de años, a lo largo del borde de esas burbujas se generan de modo natural, conforme se van expandiendo y rompiendo, columnas que tienen las mismas características que los Pilares de la Creación.

La simulación, que Balfour presentó en junio en el Encuentro Nacional de Astronomía convocado por la Real Sociedad Británica de Astronomía, mostraba, además, que las estrellas de tipo O afectan de manera inesperada a la formación de estrellas. Estudios anteriores indicaban que la ponen en marcha; en su vecindad, en efecto, suelen crearse estrellas. Según la simulación, sin embargo, las burbujas que rodean a las estrellas de tipo O destruyen a menudo las nubes generadoras de estrellas. Y en otros casos comprimen el gas circundante, de modo que la formación de estrellas se inicia antes de lo que habría empezado si no, y así acaban por ser más pequeñas. «Nos sorprendió mucho», comenta Balfour. Las simulaciones de James Edward Dale, del Observatorio Universitario de Múnich, ponen también en entredicho que las estrellas de tipo O induzcan la formación de estrellas. Según sus cálculos, el efecto desencadenante es mucho menos importante que el destructivo, tal y como parece suceder también en las simulaciones de Balfour. Es una verdad universal: destrucción y creación van de la mano. —*Clara Moskowitz*

CORTESÍA DE LA NASA, ESA, STScI, J. HESTER Y P. SCOWEN, UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE ARIZONA (*nebulosa*); UNIVERSIDAD DE MÁLAGA (*noche de los investigadores*)

AGENDA

CONFERENCIAS

9 de septiembre
La tecnología detrás del *big data*
Jordi Torres Vinyals, Universidad Politécnica de Cataluña
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
www.cccb.org > Agenda

17 de septiembre
Optimizando los procesos de investigación en enfermedades raras y drogas huérfanas
Virginia Llera, Fundación GEISER
Ciclo «Enfermedades raras»
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.vhir.org

18 de septiembre
El círculo virtuoso de la ciencia y la innovación
Isabel Béjar, CERN
Ciclo «Los secretos de las partículas. La física fundamental en la vida cotidiana»
Palacio del Marqués de Salamanca
Madrid
www.fbbva.es > agenda

OTROS

Del 1 al 7 de septiembre
XVII Congreso mundial de prehistoria y protohistoria
Universidad de Burgos
Burgos
www.burgos2014uispp.com

15 y 16 de septiembre
Campus Gutenberg. Comunicación y cultura científica
Campus de la Comunicación Poblenou
Universidad Pompeu Fabra
Barcelona
gutenberg.idec.upf.edu

18 de septiembre - Teatro
The Big Van Theory (Científicos sobre ruedas)
Auditorio Teobaldo Power
La Orotava, Tenerife
www.ciudadciencia.es > Agenda

26 de septiembre
La noche de los investigadores
En toda Europa
ec.europa.eu/research/researchersnight



GENÓMICA

ARN y proteínas quiméricos

Otra forma de codificar la información en el genoma

MILANA FRENKEL-MORGENSTERN Y ALFONSO VALENCIA

Conforme avanza la adquisición automática de datos genómicos, los conceptos básicos en biología molecular están sufriendo una profunda revisión. La propia definición de lo que es un gen parece cada vez más elusiva. Y el dogma central clásico de la biología (cada gen genera, mediante un ARN mensajero, una proteína) ha pasado a la historia: si este fuera cierto, ¿cómo se explicaría que el número de proteínas de nuestro organismo sea muy superior al de genes? En nuestro grupo de investigación nos hemos propuesto ahondar en esta cuestión.

Sabemos que un gen puede dar lugar a varias proteínas. Sin embargo, este fenómeno es poco habitual. Debe haber, pues, otros mecanismos que multipliquen la variedad de proteínas que pueden obtenerse a partir de cierto número de genes. Uno de estos mecanismos podría ser el responsable de la formación de ARN quiméricos, fruto de la colaboración entre genes distantes en el genoma.

Los ARN quiméricos corresponden a moléculas de ARN maduro que incluyen exones de dos genes diferentes. Son muy distintos de los ARN generados por el proceso «normal» de traducción genómica, en el que la información de un solo gen se traslada primero a una copia complementaria de ARN, para luego, mediante un complejo proceso de corte y empalme (*splicing*) en el que se eliminan ciertas regiones (intrones) y se retienen otras (exones), dar lugar a un ARN mensajero maduro (sucesión lineal de exones), que, una vez traducido, produce una proteína completa funcional. Las quimeras suponen una alteración de esta traducción lineal, puesto que la secuencia de los ARN maduros y las correspondientes proteínas incluyen partes de dos genes distantes.

Las fuentes más directas de quimeras son las translocaciones y otras reorganizaciones cromosómicas que ponen en contacto directo regiones de distintos cromosomas. Estos procesos son característicos de algunos linfomas; se encuentran también en tumores sólidos y, cada vez más, en otro tipo de enfermedades como la esquizofrenia o el síndrome de Down. Asimismo, los ARN quiméricos también podrían deberse a alteraciones —todavía desconocidas— en el funcionamiento de la maquinaria de corte y empalme.

¿Qué peso tienen las quimeras en la codificación de la información genómica? ¿Se trata de una anomalía propia de procesos patológicos o bien constituye un fenómeno habitual que contribuye a explicar la variedad de proteínas?

Abundantes y funcionales

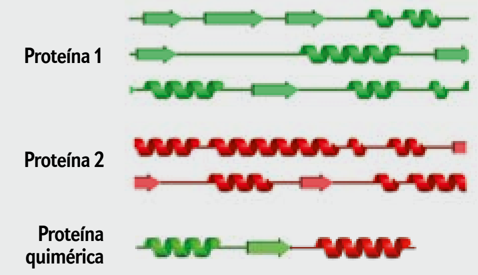
Gracias a las nuevas técnicas de secuenciación, hemos dado un paso adelante en la comprensión de esta cuestión. En colaboración con científicos de la francesa Universidad Claude Bernard, del Instituto Científico Weizmann de Rejóvot y del Centro de Regulación Genómica de Barcelona, hemos establecido procedimientos computacionales que, mediante la combinación de información funcional,

EN BUSCA DE QUIMERAS

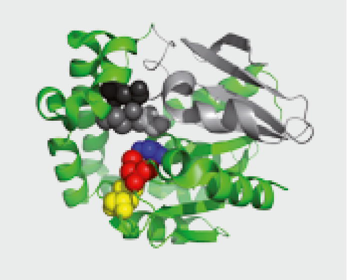
La colaboración entre genes distantes en el genoma da lugar a estructuras híbridas, o quiméricas. Merced al desarrollo de las nuevas técnicas de la biología molecular, la detección y el estudio de las quimeras ha avanzado de forma notable.

ARN
Los experimentos de secuenciación masiva de ARN arrojan grandes cantidades de lecturas que pueden compararse. Las que solapan con el punto de ensamblaje (*rojo*) de dos genes permiten identificar la presencia de posibles ARN quiméricos.

Proteínas
Mediante una técnica proteómica que permite detectar los péptidos de la región de unión de dos proteínas, se identifican proteínas quiméricas. El ejemplo de la ilustración corresponde a las proteínas bifenil hidrolasa (*verde*) y tubulina beta 2A (*rojo*).



Proteínas 3D
En ciertos casos es posible obtener incluso la estructura proteínica tridimensional mediante cristalografía de rayos X. La imagen muestra la bifenil hidrolasa, en la que se destacan la región que en la proteína quimérica es sustituida por el fragmento de tubulina beta 2A (*dominios grises*) y los seis aminoacidos que forman el centro activo (*bolas*), de los cuales tres (*bolas grises*) se hallan ausentes en la proteína quimérica.



CORTESÍA DE LOS AUTORES

análisis de datos de secuenciación de ARN y experimentos de espectrometría de masas, nos han permitido identificar un gran numero de quimeras.

En un primer estudio analizamos un conjunto de 7424 candidatos, de los cuales pudimos confirmar la expresión de 175 quimeras, distribuidas en 16 tejidos humanos normales. Aunque la mayoría de los ARN quiméricos se expresan débilmente, identificamos los péptidos correspondientes a la región frontera entre los dos genes que forman la quimera en 12 nuevos casos. Ello demuestra que, a pesar de su bajo nivel de expresión, estas quimeras producen proteínas estables.

Si bien, por razones técnicas, es mucho más facil obtener datos genómicos que proteómicos, estos últimos proporcionan un nivel mucho más alto de fiabilidad que los primeros. En nuestro caso, utilizamos la monitorización selectiva de reacciones (*selected reaction monitoring*), una técnica que permite identificar con gran precisión péptidos específicos. Mediante este método hemos identificado tres proteínas quiméricas en tumores de mama, próstata y ovario.

Nuestra colección de quimeras (ChiTaRS), hasta la fecha la mayor disponible, nos ha permitido determinar algunas de sus características más relevantes. En primer lugar, los transcritos incorporan nuevas combinaciones de dominios, lo que sugiere una explosión de la combinatoria de funciones de las proteínas quiméricas. En segundo lugar, las quimeras incluyen —con una frecuencia sorprendentemente mayor a la esperada— dominios que determinan la localización intracelular de las proteínas (péptidos señal y hélices transmembrana); ello hace pensar que estas quimeras desempeñarían funciones en zonas distintas de las proteínas que las componen. Finalmente, algunas incorporan genes que se expresan con fuerza, lo que sugiere que, en determinadas situaciones de estrés (asociadas a enfermedades, por ejemplo), las quimeras podrían producirse en mayores cantidades.

Nuestros resultados han revelado también la presencia de quimeras en tejidos normales, en los que no se detectan reorganizaciones cromosómicas. Ello indica la existencia de un proceso molecular, posiblemente relacionado con la maquinaria de corte y empalme, que aún no ha sido caracterizado en humanos.

Aplicaciones biomédicas

Además de desentrañar ciertas claves de la biología molecular, esos conocimientos se traducen en aplicaciones clínicas. Para empezar, las quimeras pueden utilizarse a modo de marcadores de enfermedades; en particular, de progresión tumoral. El caso mejor conocido es la BCR-ABL1, característica de la leucemia mieloide crónica; se trata de la diana de uno de los tratamientos de cáncer más efectivos. Asimismo, se han registrado más de veinte patentes de genes quiméricos marcadores de otros tipos de tumores.

Por otro lado, las exigencias de fiabilidad de los estudios clínicos harán que la proteómica desempeñe una función cada vez más importante como instrumento de validación. Técnicas como la monitorización selectiva de reacciones, que puede realizarse en paralelo para procesar hasta cincuenta quimeras simultáneamente en cientos de muestras, pueden llegar a reemplazar a los métodos inmunológicos para la detección de biomarcadores actualmente empleados.

Las quimeras suponen, por tanto, un reto para la investigación básica (todavía no comprendemos los mecanismos moleculares por los que se generan ni su papel modulador de las funciones celulares) y abren nuevas vías de aplicación biomédica, ya sea en calidad de biomarcadores o de dianas farmacológicas.

—Milana Frenkel-Morgenstern
y Alfonso Valencia
Programa de biología estructural
y biocomputación
Centro Nacional de Investigaciones
Oncológicas
Madrid

PARA SABER MÁS

Chimeras taking shape: Potential functions of proteins encoded by chimeric RNA transcripts. Milana Frenkel-Morgenstern et al. en *Genome Research*, vol. 22, págs. 1231-1242, julio de 2012.

ChiTaRS: A database of human, mouse and fruit fly chimeric transcripts and RNA-sequencing data. Milana Frenkel-Morgenstern et al. en *Nucleic Acids Research*, vol. 41 (número sobre base de datos), D142-51, enero de 2013.

BIOGEOQUÍMICA

Metano y temperatura

Las emisiones de metano en un ecosistema presentan una dependencia de la temperatura más simple y elevada de lo que se pensaba

TORI M. HOEHLER Y MARC J. ALPERIN

El metano es el tercero de los principales gases que contribuyen al efecto invernadero, después del vapor de agua y el dióxido de carbono. La concentración atmosférica de metano aumentó durante buena parte del siglo xx, se mantuvo estable entre 1999 y 2006 y está aumentando de nuevo, a una tasa del 0,4 por ciento anual. La causa de esta reanudación no está del todo clara, pero probablemente guarde relación con un repunte de las emisiones de metano en humedales (casi la mitad de las emisiones globales de metano proceden de humedales y arrozales, los cuales se supone que se hallan sometidos a los efectos del cambio de temperatura y a otras retroacciones del cambio climático global).

Aunque el conjunto de factores que influyen sobre las emisiones de metano es complejo, parece que la relación de estas con la temperatura no lo es tanto. Gabriel Yvon-Durocher, de la Universidad de Exeter, y sus colaboradores han evaluado este fenómeno en varios ecosistemas. Según los resultados de su metanálisis, publicados en *Nature*, la relación entre las emisiones de metano y la temperatura puede describirse mediante una fórmula matemática sencilla. Una simplicidad sorprendente.

La mayor parte de las emisiones naturales de metano tiene su origen en microorganismos metanógenos. Durante

el crecimiento en cultivos con sustrato ilimitado, sus tasas metabólicas cambian con la temperatura según la ecuación de Arrhenius: una simple dependencia exponencial de la constante de velocidad (o cinética) del inverso de la temperatura absoluta. Dicho comportamiento no sorprende: aunque la metanogénesis comprende toda una red de reacciones catalizadas por enzimas, la dependencia de Arrhenius refleja la cinética de un único paso limitador de la velocidad. Lo que sí resulta notable es que la misma dependencia se produzca a escala ecosistémica, si tenemos en cuenta que hay todo un abanico de factores físicos, químicos y ecológicos que controlan la producción de metano y su liberación a la atmósfera.

La complejidad ecológica

En último término, la metanogénesis en suelos y sedimentos se nutre de materia orgánica compleja; la proporción que de dicha materia orgánica se convierta en metano, y a qué velocidad, depende tanto de la dinámica del ecosistema como de la cinética enzimática de los metanógenos. Por ejemplo, el carbón orgánico puede ser convertido en dióxido de carbono, y no en metano, cuando agentes oxidantes como el oxígeno, el nitrato, el hierro (III) y el sulfato se hallan disponibles para los competidores microbianos de los metanógenos. Y cuando la materia orgánica sí es convertida en metano, primero hace falta que otros microbios la descompongan en los pocos sustratos simples que los metanógenos pueden metabolizar —un suministro inicial que puede limitar la tasa de metanogénesis.

El transporte del metano desde el lugar de producción a la atmósfera se halla también sujeto a efectos que podrían oscurecer una dependencia puramente bioquímica de la temperatura. El metano se consume en procesos microbianos tanto aeróbicos como anaeróbicos, y el transporte a través de zonas en las que tiene lugar dicho consumo puede reducir de forma notable las emisiones netas. Pero el consumo puede evitarse en gran medida cuando factores físicos y metabólicos se combinan para promover la ebullición (formación y liberación de burbujas de metano, un fenómeno fácilmente observable en lagos y pantanos productivos). El sistema vascular de las plantas también puede facilitar el transporte de metano, cuando las raíces penetran en las porciones de suelos que producen este gas y proporcionan un conducto directo a la atmósfera; pero estos mismos conductos también transportan oxígeno que inhibe la metanogénesis y promueve el consumo de metano.

En su análisis de 127 estudios ecosistémicos sobre la dependencia de la emisión de metano respecto de la temperatura, Yvon-Durocher y sus colaboradores reconocen este complejo conjunto de factores, pero concluyen que, aun así, la respuesta global queda descrita por la ecuación de Arrhenius, con una energía de activación (E_a) aparente de 0,96 electronvoltios (eV), similar a los 1,10 eV que se observan en cultivos puros de metanógenos. (E_a representa una medida de la sensibilidad a la temperatura; por ejemplo, 0,96 y 1,10 eV corresponden, respectivamente, a un aumento de 3,5 y 4,2 veces en la velocidad constante para un aumento de temperatura de 20 a 30 ºC.)

Desde el punto de vista estadístico, el gran número de trabajos considerados en este metanálisis permite afirmar que la E_a media calculada (0,96 eV) refleja con exactitud la sensibilidad a la temperatura media de los ecosistemas emisores de metano —suponiendo que las localidades analizadas constituyen una muestra representativa de todos estos ambientes—. Pero el impacto de factores distintos de la temperatura resulta evidente en la dispersión y extensión de los conjuntos de datos individuales analizados. Alrededor del 40 por ciento de los estudios presentaban coeficientes de correlación (r^2) para el gráfico de Arrhenius inferiores a 0,5, lo que indica que menos de la mitad de la varianza en dichos datos de emisiones es explicada por la relación de Arrhenius; asimismo, alrededor del 10 por ciento de los estudios midieron emisiones de metano que eran mayores a temperaturas más bajas —precisamente lo contrario del comportamiento que predice la ecuación de Arrhenius.

La E_a que se propone a nivel ecosistémico es superior a lo que se ha denominado la «dependencia universal de la temperatura» del metabolismo aeróbico: una E_a de 0,67 ± 0,15 eV que abarca el metabolismo de una amplia gama de plantas, protozoos, invertebrados y vertebrados; y es también superior a la E_a media (0,72 eV) observada para un grupo diverso de 50 microorganismos aerobios y anaerobios. Por tanto, la mayor E_a media calculada por el equipo de Yvon-Durocher podría reflejar o bien que la bioquímica de los metanógenos (que tienen una E_a media de 1,10 eV) limita directamente las emisiones de metano en algunos ecosistemas, o bien que los organismos que suministran los sustratos a los metanógenos presentan una dependencia de la temperatura igualmente alta.

Respuesta al calentamiento

Con todo, la implicación clara del citado metanálisis es que la producción de me-

RED DE EMISIONES: **El metano (CH_4) es generado por microorganismos (metanógenos) que metabolizan sustratos procedentes de la descomposición de materia orgánica compleja por enzimas extracelulares y microorganismos fermentativos. La velocidad de emisión de metano a la atmósfera está influida por la sensibilidad individual de dichos microorganismos a la temperatura (E_a) y por factores químicos, como la disponibilidad de oxígeno, que desvían el flujo de carbono a competidores microbianos que oxidan la materia orgánica a dióxido de carbono. La emisión de metano depende también del transporte de gas por difusión, por ebullición de burbujas y en el sistema vascular de las plantas, así como de la fracción de metano consumida por microorganismos oxidadores de metano. A pesar de este complejo conjunto de factores, la respuesta de las emisiones de metano al nivel del ecosistema puede describirse mediante la sencilla ecuación de Arrhenius.**

tano aumentará más fuertemente con la temperatura de lo que prevén los modelos de cambio climático que suponen que esta se rige por valores más típicos (inferiores) de E_a. Por ejemplo, para el rango de calentamiento global que se proyecta para este siglo (1,0-3,7 ºC), una E_a de 0,96 eV sugiere un aumento de entre el 14 y el 63 por ciento en las emisiones de metano, mientras que a una E_a de 0,67 eV le correspondería una subida de entre el 10 y el 40 por ciento.

Los hallazgos de Yvon-Durocher y sus colaboradores limitan, y quizá simplifican, una pieza de un rompecabezas mucho mayor del cambio climático. Las retroacciones de las emisiones de metano en respuesta al cambio climático global derivarán, en último término, de una combinación de los efectos directos de la temperatura considerados aquí y de los efectos indirectos, como la fusión del permafrost (y la disponibilidad resultante de nueva materia orgánica), los cambios en la vegetación y la inundación o desecación de suelos y humedales a gran escala. Además, la contribución proporcionada del metano al caldeamiento global (del orden del 20 por ciento durante el último siglo) puede disminuir conforme el dióxido de carbono adopte un papel cada vez más prominente en el futuro. Pero en la resolución de este problema complejo —a diferencia del flujo de metano hacia la atmósfera— todo ayuda.

—Tori M. Hoehler
División de ciencia espacial y astrobiología
Centro de Investigación Ames
NASA
—Marc J. Alperin
Dpto. de ciencias marinas
Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 507, págs. 436-437, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

Climate change 2013: The physical science basis. Contribución del grupo de trabajo I al 5.º informe de asesoramiento para el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Dirigido por Thomas F. Stocker et al. Cambridge University Press, 2013. **www.ipcc.ch/report/ar5/wg1**

Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. Gabriel Yvon-Durocher et al. en *Nature*, vol. 507, págs.488-491, 2014.

QUÍMICA TEÓRICA

Mecanismo molecular de las mutaciones espontáneas

La transferencia temporal de protones en el par de bases guanina-citosina del ADN, catalizada por las moléculas de agua del entorno, estaría detrás de este escurridizo fenómeno

JOSÉ PEDRO CERÓN CARRASCO, ALBERTO REQUENA Y JOSÉ ZÚÑIGA

Las mutaciones son, por así decirlo, la cara y la cruz de la vida tal como la conocemos. La cara, porque proporcionan un mecanismo de selección y adaptación de las especies a un entorno cambiante; la cruz, porque pueden provocar en los individuos menos favorecidos alteraciones patológicas, que, en última instancia, podrían conducir a la muerte.

Una mutación corresponde a un cambio en el código genético cuyas «letras» son las cuatro bases que mantienen unidas las dos hebras de ADN: adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C). La peculiaridad de estas moléculas es que siempre se emparejan siguiendo un patrón fijo, en el que la adenina se une solo a la timina, formando el par AT, y la guanina se une solo a la citosina, formando el par GC. La unión de las bases tiene lugar por medio de enlaces de hidrógeno, que se forman cuando un átomo muy electronegativo (con una fuerte tendencia a atraer electrones), como los de oxígeno y nitrógeno presentes en las bases del ADN, «tira» del átomo de hidrógeno unido a otro átomo también muy electronegativo, perteneciente a otra base. Los enlaces de hidrógeno constituyen, pues, los puntos de anclaje de los pares de bases AT y GC en la cadena de ADN. En el par AT hay dos de estos enlaces; en el par GC, tres.

Cualquier alteración del entramado molecular del ADN puede desembocar en una mutación. Esta puede deberse a agentes externos, como radiaciones ionizantes o especies químicas oxidantes, en cuyo caso hablamos de mutaciones inducidas, o puede ocurrir sin causa aparente alguna, y decimos entonces que se trata de una mutación espontánea.

Intercambio de protones

La naturaleza incierta de las mutaciones espontáneas hace pensar que bajo las mismas subyacen reacciones químicas que, en un momento dado, pueden favorecer la aparición de un producto no deseado. Esta es la tesis presentada en un artículo ya clásico que Per-Olov Löwdin, de la Universidad de Uppsala, publicó en 1963 en *Reviews of Modern Physics*. El trabajo de Löwdin proponía que las mutaciones espontáneas podrían tener su origen en intercambios de los átomos de hidrógeno, o protones, que mantienen unidos los pares de bases del ADN.

En la visualización dinámica, más realista, del enlace de hidrógeno, el protón se halla moviéndose entre los dos átomos electronegativos (entre las dos bases), de modo que, temporalmente, puede quedar atrapado por la base a la que no pertenece. En ese momento ha tenido lugar una transferencia protónica de una base a otra. Puede decirse que el enlace de hidrógeno se ha «roto por el lado equivocado», dando lugar a una alteración genética que puede acabar en una mutación.

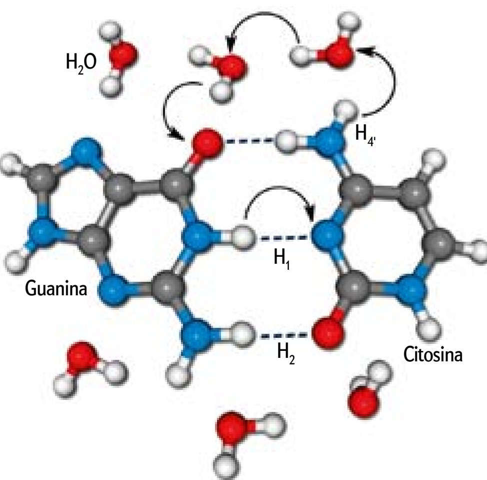
Para investigar experimentalmente si las mutaciones espontáneas tienen lugar mediante intercambios protónicos, es necesario detectar, en las larguísimas cadenas de ADN, los átomos de hidrógeno transferidos temporalmente de una base a otra. Pero el número de estos protones es tan escaso que cae muy por debajo de los límites de sensibilidad de las técnicas experimentales disponibles en la actualidad. Es como buscar una aguja en un pajar.

Lo que sí puede hacerse a día de hoy es estudiar las transferencias protónicas entre los pares de bases del ADN usando los métodos teóricos de la química cuántica. Se trata de simular, mediante modelos computacionales, los procesos mecanocuánticos que tienen lugar en las moléculas de interés. Estos modelos permiten calcular la energía asociada a cada estado de las moléculas y, por tanto, determinar tanto la estabilidad de estas como la probabilidad de que ocurra una reacción química concreta.

Uno de los primeros trabajos teóricos de ese tipo se realizó sobre un modelo formado por un único par de bases aislado. Lo llevaron a cabo Jan Florián, entonces en la Universidad Carlos de Praga, y sus colaboradores. Los resultados, publicados en *Journal of the American Chemical Society* en 1994, indicaron que las transferencias protónicas entre el par de bases AT eran termodinámicamente inviables, es decir, que no podían ocurrir de forma espontánea. El origen de las mutaciones espontáneas había que situarlo, por tanto, en los intercambios protónicos entre el par GC.

Nuestro grupo trabaja desde hace varios años en esa línea de investigación, en colaboración con Denis Jacquemin, de la Universidad de Nantes. El propósito de nuestra labor es simular de forma realista el entorno en el que tienen lugar dichos procesos. Para ello hemos diseñado un modelo básico de ADN formado por un par de bases GC central, en el que estudiamos el intercambio protónico, encajado entre otros dos pares de bases, también de GC, y rodeado de moléculas de agua individuales en la primera capa de solvatación. Nuestros primeros resultados con este trímero de ADN, publicados en *Physical Chemistry Chemical Physics* en 2011, confirmaron que, en efecto, en el par de bases GC había una posibilidad termodinámicamente viable de transferencia protónica.

En realidad, la transferencia, o intercambio protónico, en ese sistema es doble. En primer lugar se transfiere el protón del enlace de hidrógeno central (H_1) desde la guanina (base a la que pertenece) a la citosina; inmediatamente después, uno de los protones de la citosina ($H_{4'}$) pasa a la guanina mediante un proceso catalizado por las moléculas de agua más cercanas. Asimismo, hemos comprobado que los protones intercambiados se mantienen «fuera de su lugar» durante el tiempo suficiente como para inducir un error permanente en la secuencia genética, ya que la probabilidad de que los protones permanezcan intercambiados es compatible con la frecuencia observada de mutaciones espontáneas.



MODELO QUÍMICO DEL PAR guanina-citosina utilizado para realizar los estudios teóricos de la transferencia protónica entre bases del ADN. Los resultados indican que el intercambio de hidrógenos es doble (*flechas*): primero se transfiere el H_1 de la guanina a la citosina; luego, el $H_{4'}$ de la citosina pasa a la guanina mediante la acción catalítica de las moléculas de agua circundantes (H_2O) (se omite el resto del fragmento de ADN para facilitar la visualización del proceso).

Influencias externas

Aunque las mutaciones pueden clasificarse en inducidas y espontáneas, esta división es más bien académica. En realidad, ambos tipos se hallan interrelacionados. En trabajos más recientes hemos observado que cuando la guanina reacciona con cationes de magnesio divalentes (Mg^{2+}) se promueve la transferencia del protón H_1 de la guanina a la citosina, pero se inhibe fuertemente la transferencia inversa del protón $H_{4'}$ de la citosina a la guanina. El protón H_1 retorna, además, rápidamente a su base original (guanina), desactivando el efecto mutagénico de la transferencia protónica. Asimismo, uno de los fármacos antitumorales de mayor uso, el cisplatino, que actúa uniéndose simultáneamente a dos bases de guanina vecinas provocando la distorsión y rotura de la hebra de ADN, promueve también la transferencia del protón H_1 de la guanina a la citosina, pero con una alta probabilidad de inducir una mutación espontánea.

Nuestras últimas investigaciones, recogidas en *Accounts of Chemical Research*, se han centrado en el efecto que provoca la aplicación de un campo eléctrico en el par de bases GC. Hemos visto que cuando el campo es suficientemente intenso puede, no ya promover, sino inducir directamente la transferencia protónica entre bases de una forma selectiva: se favorece el traspaso del protón H_1 de la guanina a la citosina o, alternativamente, del protón H_2 de la citosina a la guanina, según la dirección en la que se aplique el campo. Para evitar la distorsión y rotura de la cadena de ADN provocada por la exposición continua al campo eléctrico, es necesario limitar la aplicación del mismo a períodos de tiempos ultracortos (del orden de los picosegundos). Ello podría abrir una nueva vía para el diseño de terapias anticancerígenas, basadas en la generación de mutaciones espontáneas controladas por campos eléctricos.

Aunque los modelos y métodos de la química cuántica todavía tienen un largo camino por recorrer, actualmente permiten investigar los mecanismos de una amplia variedad de fenómenos biológicos, entre los que se encuentran los que dan lugar a las mutaciones espontáneas y, por supuesto, a las más patentes mutaciones inducidas. Asimismo, es posible estudiar, en paralelo con las técnicas de síntesis química, la eficacia de los anticancerígenos de nueva generación, herederos del cisplatino. Este maridaje teórico-experimental se vislumbra, pues, como una estrategia prometedora para futuros avances en este campo.

—José Pedro Cerón Carrasco,
Alberto Requena y José Zúñiga
Dpto. de química física
Universidad de Murcia

PARA SABER MÁS

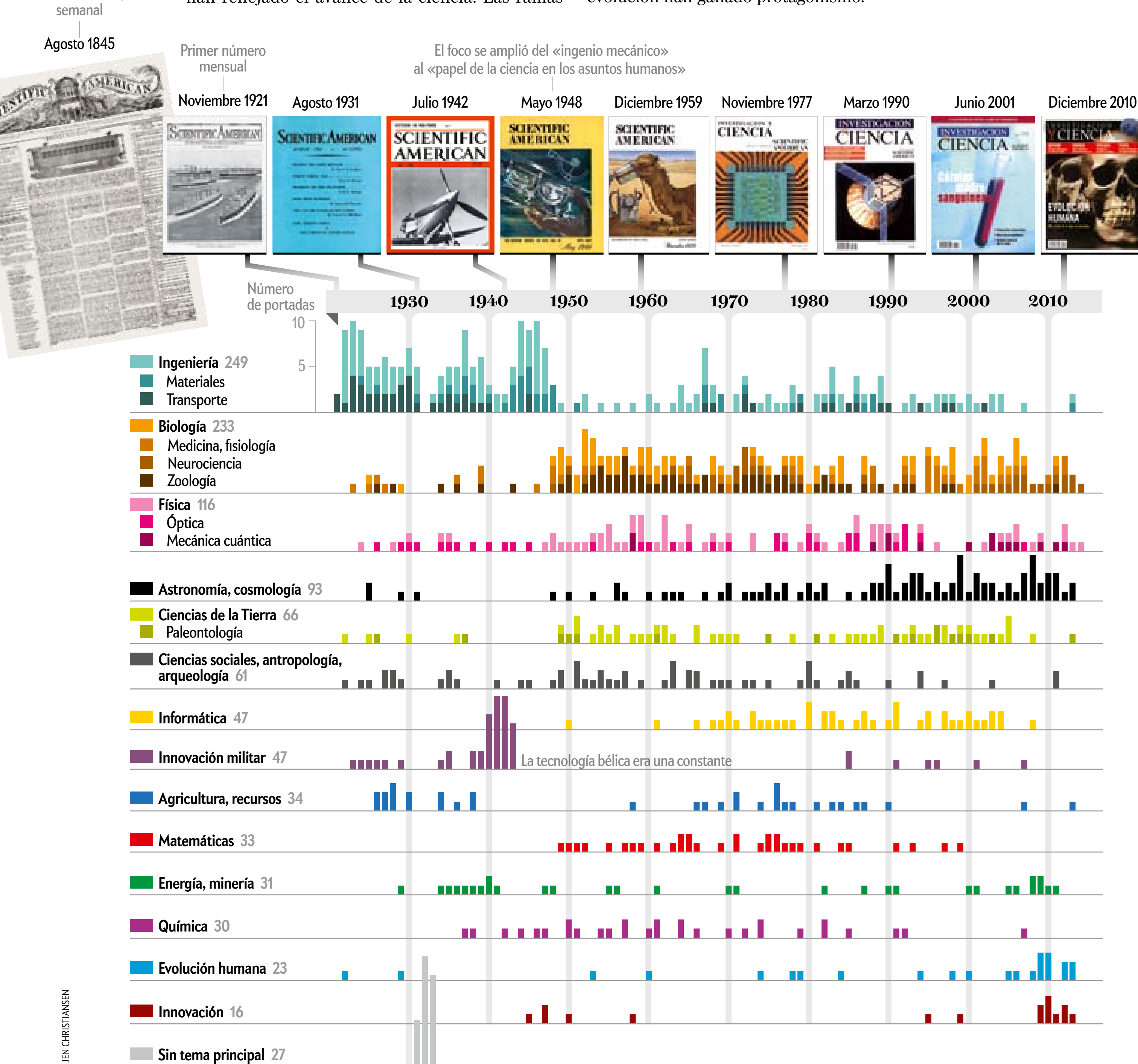
Proton tunneling in DNA and its biological implications. Per_Olov Löwdin en *Reviews of Modern Physics*, vol. 35, págs. 724-732, 1963.
Combined effect of stacking and solvation on the spontanoues mutation in DNA. J. P. Cerón-Carrasco et al. en *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 13, págs. 14584-14589, 2011.
Assessing the importance of proton transfer reactions in DNA. D. Jacquemin et al. en *Accounts of Chemical Research*, DOI: 10.1021/ar500148c, 2014.

Los intereses de la ciencia

La evolución de la investigación científica a través de las portadas

JEN CHRISTIANSEN Y MARK FISCHETTI

Cuando *Scientific American* pasó a ser mensual, en 1921, se concebía como una publicación sobre información «práctica» —una de las definiciones de «científica»—. Desde entonces, los temas de portada (en *Investigación y Ciencia* desde 1976) han reflejado el avance de la ciencia. Las ramas aplicadas (como la ingeniería) predominaron hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la atención se centró en el mundo natural (biología) y, más tarde, también en cuestiones teóricas (física, astronomía). En la actualidad, la neurociencia y la evolución han ganado protagonismo.



JEN CHRISTIANSEN

INNOVACIÓN

La minería de textos científicos aporta pistas sobre el potencial innovador de las investigaciones

Un programa de una agencia de inteligencia de Estados Unidos analiza el lenguaje en patentes y artículos científicos para identificar técnicas con un futuro prometedor

SARA REARDON

Un proyecto respaldado por una agencia de inteligencia estadounidense podría pronto facilitar en gran medida la predicción de las técnicas que algún día tendrán una gran importancia. Los resultados, revelados el pasado mes de mayo por la Agencia de Inteligencia de Proyectos de Investigación Avanzada (IARPA), sugieren que ciertos indicios en la redacción de los artículos científicos y las patentes, además de las relaciones entre ellos, podrían predecir el éxito de las investigaciones.

El proyecto, llamado Previsión y Conocimiento a partir de la Explicación Científica (FUSE en inglés), permitiría a los organismos financiadores escoger las técnicas «triunfantes» y ayudar a los Gobiernos a vigilar las «perjudiciales», por ejemplo, aquellas que consideren que puedan amenazar la seguridad nacional o exceder las normas. Entre algunos de los ejemplos precedentes se encuentran las nanotecnologías y las tecnologías de la información, como el uso del Sistema de Posicionamiento Global en teléfonos móviles para permitir el seguimiento de los movimientos de individuos. El proyecto FUSE, que comenzó en 2011, entró en mayo en su última fase: la predicción de éxitos futuros en un plazo de tres a cinco años.

El discurso del éxito

Aunque en el pasado ya se ha explorado el texto de resúmenes de artículos en busca de palabras clave y otras pistas lingüísticas, FUSE es uno de los primeros proyectos donde la exploración abarca el texto completo de artículos y patentes. Hasta ahora ha realizado más de dos millones de análisis de datos precedentes con el fin de seleccionar avances fundamentales, afirma Dewey Munick, director del proyecto. Entre estos ha identificado varios centenares de indicadores que resaltan las áreas emergentes, como son nuevas colaboraciones o expresiones de entusiasmo en el texto.



EL AUGE DE TÉCNICAS COMO EL GPS podría haberse pronosticado mediante el análisis de la bibliografía publicada.

© THINKSTOCK/RAFAL STACHURA

«Lo que nos gustaría averiguar es la combinación de elementos que conduce al éxito», declara John Byrnes, informático en SRI International, un centro de innovación en Menlo Park (California), cuyo equipo es uno de los tres que desarrolla *software* para FUSE. Para llevar a cabo las predicciones, su programa explora el texto en busca de palabras clave, citas y frases que indiquen las opiniones de los autores en artículos importantes.

Cita el ejemplo de un problema técnico cuya resolución condujo a lo que ahora constituye un pilar fundamental de la tecnología de paneles solares. A mediados de los años noventa se invirtieron millones de dólares en la investigación de paneles solares que empleaban soluciones acuosas para convertir fotones en energía eléctrica. Aunque en un principio esta técnica parecía prometedora, en 2008 ya la habían superado los paneles solares de estado sólido, mucho más estables y eficaces. FUSE podría haber predicho el final de los paneles acuosos, según los resultados presentados por Byrnes y su equipo en mayo en la reunión SunShot Grand Challenge del Departamento de Energía de Estados Unidos en Anaheim (California).

El análisis de la bibliografía científica, o «cienciometría», se realiza desde hace décadas. Organizaciones como Thomson Reuters, una empresa de información con sede en Nueva York, han usado desde hace tiempo estos análisis para identificar los artículos científicos o investigadores con mayor influencia en un determinado campo de investigación. FUSE ha avanzado en esta estrategia con la exploración de millones de artículos y patentes tanto en inglés como en chino, dos de los lenguajes más usados en la bibliografía científica.

El análisis y los indicadores pueden predecir si un campo incipiente se conver-

tirá en importante o si es simplemente un manantial de entusiasmo, que se agotará pronto, declara Olga Babko-Malaya, ingeniera de investigación en BAE Systems en Winchester (Massachusetts), que dirige otro equipo de FUSE.

Su equipo usa algoritmos para analizar el «sentimiento» en el lenguaje natural de los artículos. Por ejemplo, los autores pueden afirmar que su trabajo contradice o se basa en un artículo citado, o usar un lenguaje descriptivo que expresa entusiasmo.

Los investigadores también han descubierto que alrededor de los temas prometedores se crea una jerga propia a través de un mayor uso de acrónimos. «Las abreviaturas implican aceptación por la comunidad y constituyen indicadores de técnicas más desarrolladas», afirma Babko-Malaya.

Los cambios en las colaboraciones del grupo en un campo a lo largo del tiempo también pueden servir como pronosticadores. El investigador de FUSE Lance Ranshaw y su equipo en Raytheon BBN Technologies en Cambridge (Massachussets) analizan las redes entre diferentes temas, palabras clave y autores. Afirma que un nuevo tema puede ser emergente cuando los autores importantes comienzan a contribuir a un grupo de artículos que comparten rasgos comunes, o cuando cambian las alianzas entre colaboraciones.

Alan Porter, experto en predicción de tecnologías en el Instituto de Tecnología de Georgia en Atlanta, reconoce que las predicciones retrospectivas (como el ejemplo de los paneles solares) resultan útiles para trazar un modelo de lo que han estado haciendo las empresas y para estudiar la historia de un producto. Declara que la tarea más difícil sería usar esta red para identificar los «espacios en blanco»: zonas entre núcleos de tecnología que están listas para nuevas investigaciones.

En su desarrollo ideal, el análisis mostrará pautas o puntos álgidos que son comunes a casos de éxito. Con el tiempo, estas señales podrían permitir que el proyecto pronostique cuándo se podría lanzar un producto, o si un medicamento será autorizado por los legisladores, explica Babko-Malaya.

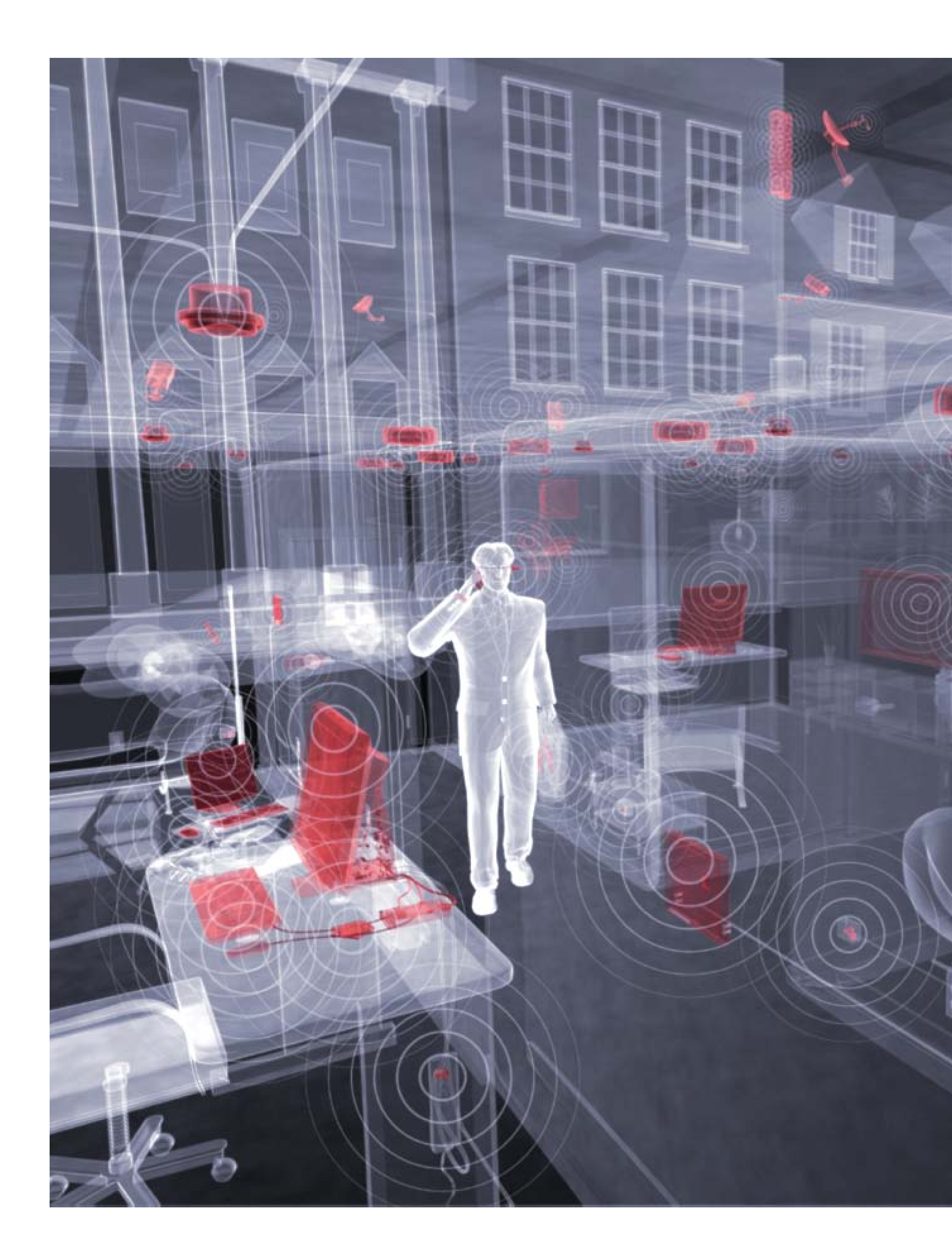
El criterio humano

Pero aunque el *software* va mejorando, los analistas humanos siguen siendo los mejores pronosticadores, afirma Murdick. «Puedes preguntar a los expertos todo lo que quieras», declara.

En otro proyecto titulado «Predicción de Ciencia y Tecnología», el IARPA subvenciona una colaboración abierta de tareas (*crowdsourcing*) en línea llamada SciCast, desarrollada por la Universidad George Mason en Fairfax (Virginia) y la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia. Su objetivo es consultar a 10.000 científicos para que ayuden a desarrollar métodos que generen pronósticos certeros. «Mi impresión personal es que una combinación de personas y máquinas será la que finalmente proporcione la opción más eficaz», sostiene Murdick.

—*Sara Reardon*
Nature

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 509, pág. 410, 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014



TECNOLOGÍA

LA ERA DE LA INFORMÁTICA UNIVERSAL

Un mundo repleto de sensores interconectados cambiará nuestra forma de ver, oír, pensar y vivir

Gershon Dublon y Joseph A. Paradiso

EN SÍNTESIS

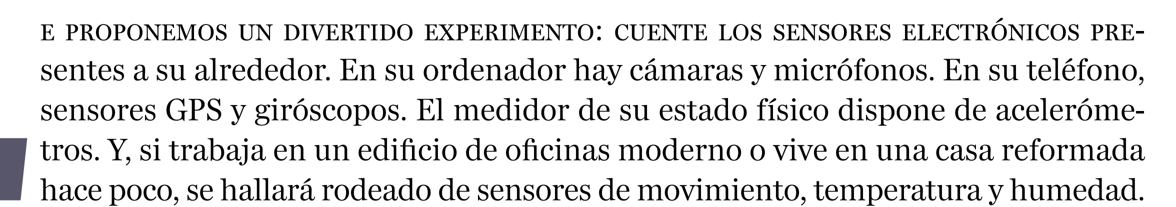
El mundo moderno está repleto de sensores electrónicos conectados en redes. Sin embargo, sus datos no se comparten. Si todo dispositivo conectado a una red pudiese acceder a esos datos, entraríamos en la era de la «informática universal».

Aunque es imposible predecir con exactitud la manera en que la informática universal cambiará nuestras vidas, cabe la posibilidad de que las redes de sensores integradas en el entorno funcionen como extensiones del sistema nervioso humano.

Conjugadas con dispositivos ponibles, las redes de sensores permitirían hacer viajes virtuales a lugares lejanos y «estar allí» en tiempo real. Todo ello acarrearía profundas consecuencias sobre nuestras nociones de privacidad y presencia física.

Gershon Dublon es estudiante de doctorado en Laboratorio de Medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde desarrolla nuevas herramientas para tratar datos procedentes de redes de sensores.

Joseph A. Paradiso trabaja en el mismo laboratorio como profesor de artes y ciencias en medios de comunicación. Dirige el Grupo de Respuesta del Entorno, que investiga el papel de las redes de sensores en la experiencia, interacción y percepción humanas.



Le proponemos un divertido experimento: cuente los sensores electrónicos presentes a su alrededor. En su ordenador hay cámaras y micrófonos. En su teléfono, sensores GPS y giróscopos. El medidor de su estado físico dispone de acelerómetros. Y, si trabaja en un edificio de oficinas moderno o vive en una casa reformada hace poco, se hallará rodeado de sensores de movimiento, temperatura y humedad.

Tal abundancia se debe a que la mayoría de estos dispositivos han evolucionado según la ley de Moore: su tamaño y coste se han reducido a medida que aumentaban sus prestaciones. Hace algunas décadas, los giróscopos y los acelerómetros que hoy incorporan todos los teléfonos inteligentes eran caros, voluminosos y su uso se limitaba a aplicaciones como naves espaciales y sistemas de teledirección de misiles. Al mismo tiempo, han estallado las conexiones en red. Gracias al progreso en el diseño de dispositivos microelectrónicos, en el aprovechamiento de la energía y en el control del espectro electromagnético, un microchip de menos de un dólar puede hoy conectar un conjunto de sensores con una red de comunicaciones inalámbrica de baja potencia.

La cantidad de información que genera todo ello reviste proporciones asombrosas, casi inimaginables. No obstante, la mayoría de los datos son inaccesibles. Hoy por hoy, toda esa información permanece «almacenada»: cada conjunto de datos queda a disposición de un único dispositivo y solo puede usarse para un fin específico, como el control de un termostato o el seguimiento del número de pasos que se dan en un día.

Si se eliminase ese riguroso estancamiento de datos, la informática y las comunicaciones cambiarían de forma drástica. Una vez que dispongamos de protocolos que permitan el intercambio de información entre dispositivos y aplicaciones —ya existen varios aspirantes—, los sensores presentes en cualquier lugar serán accesibles a todas ellas. Cuando eso suceda, entraremos en la tan anunciada era de la informática universal, que Mark Weiser vaticinó desde estas mismas páginas hace un cuarto de siglo [*véase* «El ordenador del siglo xxi», por Mark Weiser; Investigación y Ciencia, noviembre de 1991].

No creemos que la transición hacia la informática universal vaya a ocurrir de manera gradual. Sospechamos que llegará como un cambio de fase revolucionario muy similar a la llegada de la Malla Máxima Mundial (World Wide Web). Los inicios de esta evolución ya se manifiestan en algunas aplicaciones para teléfonos inteligentes, como Google Maps y Twitter, así como en las grandes empresas que han surgido a su calor. No obstante, la verdadera innovación se disparará cuando los dispositivos puedan acceder libremente a los datos de sensores universales. La siguiente oleada de empresas tecnológicas valoradas en miles de millones de dólares serán agregadores de contexto, que recopilarán la información de los sensores que nos rodean en una nueva generación de aplicaciones.

Predecir ahora cómo se verán afectadas nuestras vidas supone una empresa tan difícil como lo fue hace treinta años aventurar la manera en que Internet cambiaría el mundo. Por fortuna, la teoría de medios de comunicación puede servirnos de guía. En los años sesenta, el teórico de la comunicación Marshall McLuhan asimilaba los medios electrónicos, principalmente la televisión, a una extensión de nuestro sistema nervioso. ¿Qué diría McLuhan hoy? Con sensores por todas partes, y teniendo en cuenta las nuevas formas que existen para hacer accesibles sus datos a la percepción humana, ¿dónde se detienen nuestros sentidos? ¿Qué significará «estar presente» cuando podamos canalizar con libertad nuestra percepción a través del tiempo, el espacio y la escala?

Visualización de datos

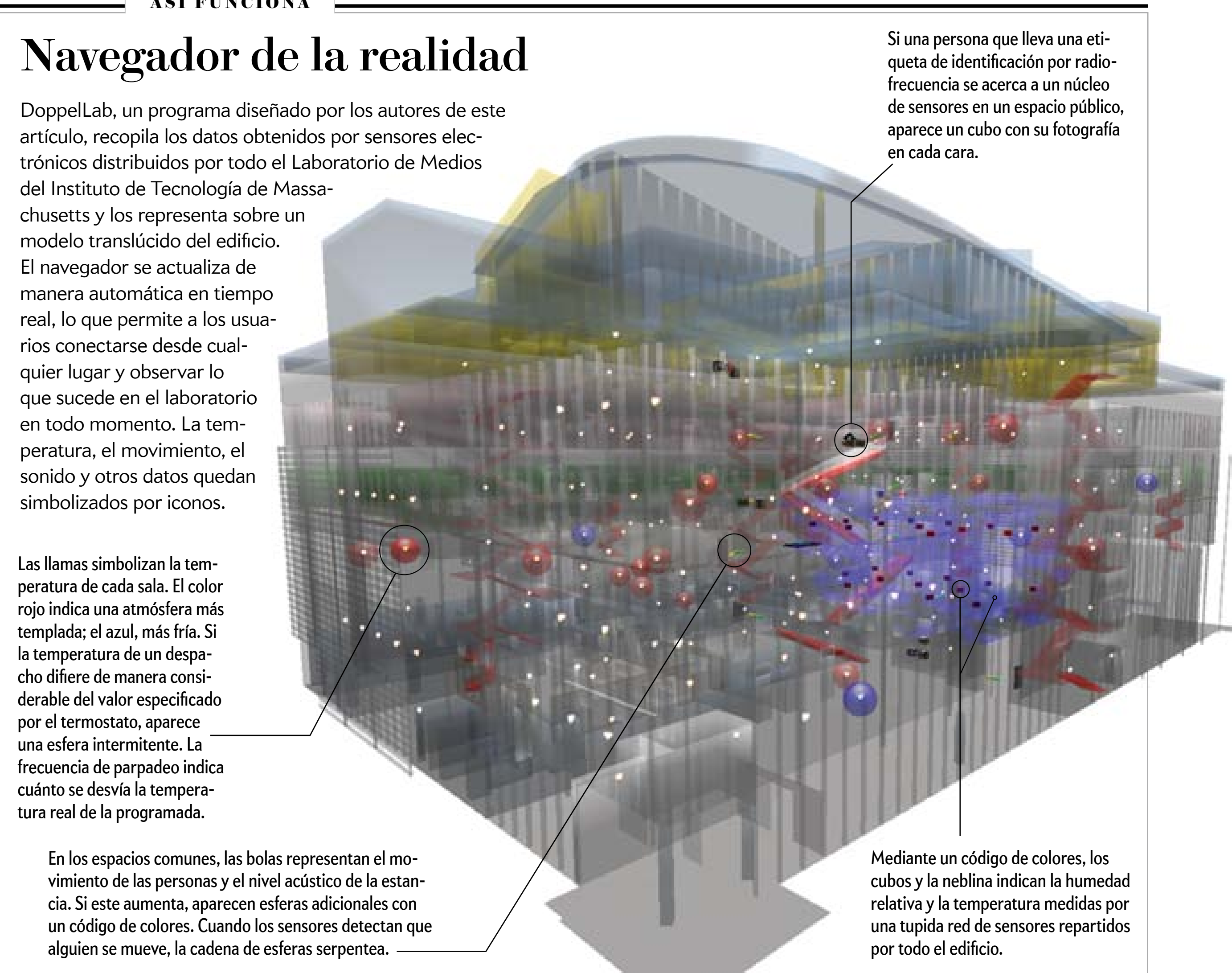
Aunque para percibir el mundo que nos rodea empleamos todos nuestros sentidos, para hacer acopio de datos digitales solemos limitarnos a las pequeñas pantallas bidimensionales de nuestros dispositivos móviles. Por tanto, no sorprende que nos encontremos atascados en un cuello de botella de información. A medida que la cantidad de datos acerca del mundo se dispara, cada vez nos vemos menos capaces de permanecer en ese mundo. Hay, sin embargo, un aspecto positivo en esa sobreabundancia de datos, siempre y cuando aprendamos a usarla con acierto. Esa es la razón por la que nuestro grupo del Laboratorio de Medios (Media Lab) del Instituto de Tecnología de Massachusetts lleva años investigando métodos para traducir la información

PÁGINAS ANTERIORES: MIRKO ILIĆ

ASÍ FUNCIONA

Navegador de la realidad

DoppelLab, un programa diseñado por los autores de este artículo, recopila los datos obtenidos por sensores electrónicos distribuidos por todo el Laboratorio de Medios del Instituto de Tecnología de Massachusetts y los representa sobre un modelo translúcido del edificio. El navegador se actualiza de manera automática en tiempo real, lo que permite a los usuarios conectarse desde cualquier lugar y observar lo que sucede en el laboratorio en todo momento. La temperatura, el movimiento, el sonido y otros datos quedan simbolizados por iconos.



CORTESÍA DE GERSHON DUBLON Y EL EQUIPO DE DESARROLLO DE DOPPELLAB

recopilada por las redes de sensores al lenguaje natural de la percepción humana.

Al igual que los navegadores como Netscape nos facilitaron el acceso a Internet, los navegadores de *software* nos permitirán dar sentido al torrente de datos de sensores que se avecina. Hasta ahora, la mejor herramienta para desarrollar un navegador así nos la han proporcionado los motores de videojuegos: los mismos programas que permiten a millones de personas interaccionar en un ambiente tridimensional realista y en constante cambio. Gracias al motor de videojuegos Unity 3D, hemos desarrollado DoppelLab, una aplicación que incorpora los datos de multitud de sensores y los representa de forma gráfica sobre un modelo arquitectónico generado por ordenador. En el Laboratorio de Medios, por ejemplo, DoppelLab integra los datos de un enjambre de sensores repartidos por el edificio y presenta los resultados a tiempo real sobre una pantalla. El usuario puede ver qué temperatura hace en cada sala, el tráfico de personas que hay en una zona determinada o incluso la posición de la bola en nuestra mesa inteligente de ping-pong.

Pero DoppelLab va más allá de la visualización de datos. También recoge el sonido que registran los micrófonos distribuidos por el inmueble y los combina para generar un ambiente sonoro virtual. Para garantizar la privacidad, los datos de audio se «camuflan» en el sensor antes de que este los transmita, un procedimiento que torna las conversaciones ininteligibles, pero que conserva el ambiente en el que se han grabado y las características de las voces de sus ocupantes. DoppelLab también posibilita experimentar con datos obtenidos con anterioridad. Permite visualizar un momento del pasado desde varias perspectivas, así como examinar los datos en diferentes escalas de tiempo. Gracias a ello, pueden descubrirse ciclos ocultos en la vida de un edificio.

Los navegadores como DoppelLab presentan aplicaciones comerciales inmediatas, como, por ejemplo, en paneles de control virtual para grandes edificios. Hasta ahora, para localizar un problema en el sistema de calefacción de un inmueble, un operario podía verse obligado a revisar gráficos y hojas de cálculo, catalogar mediciones anómalas de temperatura y buscar pistas que revelasen el origen de la avería. DoppelLab, sin embargo, permite ver de inmediato la temperatura real y la programada en cada habitación y descubrir con rapidez un problema que afecte a varias plantas o salas. Además, planificadores, diseñadores y usuarios pueden analizar qué uso recibe la infraestructura. ¿Dónde y cuándo se reúne la gente? ¿Cómo afectan los cambios

en el edificio a la forma en que las personas se relacionan y trabajan en él?

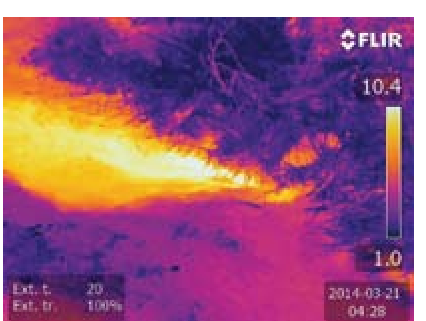
Sin embargo, no desarrollamos DoppelLab pensando en sus aplicaciones comerciales, sino con miras a investigar una cuestión de mayor calado y mucho más fascinante: ¿cómo cambiará la informática universal nuestra noción de presencia?

REPENSAR LA PRESENCIA

El día en que los sensores y los ordenadores nos permitan hacer viajes virtuales a entornos lejanos y «estar allí» en tiempo real, conceptos como *aquí* y *ahora* adquirirán nuevos significados. Nuestro grupo de investigación se ha propuesto estudiar ese cambio en la noción de presencia por medio de DoppelLab y del Observatorio Viviente de Tidmarsh Farms, un proyecto que pretende integrar visitantes reales y virtuales en un entorno natural en continua evolución.

En el sur de Massachusetts, varias organizaciones ambientales públicas y privadas han estado transformando desde 2010 cien hectáreas de campos de arándanos inundados en un humedal costero protegido. Glorianna Davenport, una de nuestras colaboradoras, es copropietaria de las ciénagas, llamadas en conjunto Tidmarsh Farms. Tras haber hecho su carrera en el Laboratorio de Medios estudiando el futuro de los documentales, Davenport quedó fascinada por la idea de que un entorno repleto de sensores pudiese grabar su propio «documental». Con su ayuda, estamos diseñando redes de sensores que registren procesos ecológicos y que permitan a las personas experimentar los datos generados. A tal fin, hemos empezado a instalar en Tidmarsh Farms cientos de sensores inalámbricos de temperatura, humedad ambiental, humedad del terreno, luz, movimiento, viento, sonido, flujo de savia de los árboles y, en algunos casos, de medición de niveles de diversos parámetros químicos.





EN UNA CIÉNAGA provista de sensores, las cámaras de infrarrojos detectan aguas subterráneas (*amarillo*) que fluyen hacia la superficie, más fría. Mientras la temperatura del agua superficial se aproxima a la del aire, la subterránea mantiene una temperatura constante durante todo el año.

CORTESÍA DE TIDMARSH FARMS, INC.

Un diseño adecuado permitirá que los sensores funcionen con baterías durante años. Algunos contarán con células solares que proporcionarán la energía suficiente para realizar transmisiones de audio de sonidos como el de la brisa, el canto de pájaros y las gotas de lluvia que caigan sobre hojas cercanas. Nuestros colaboradores de la Universidad de Massachusetts en Amherst están instalando en Tidmarsh Farms sensores ecológicos avanzados, entre los que figuran termómetros de fibra óptica sumergibles o instrumentos para medir los niveles de oxígeno disuelto en el agua. Toda esa información se guardará en nuestros servidores, en una base de datos que los usuarios podrán consultar y examinar a través de varias aplicaciones.

Algunas de ellas ayudarán a los ecólogos a consultar los datos ambientales del pantanal. Otras se diseñarán para el público general. Por ejemplo, estamos desarrollando un navegador semejante a DoppelLab que permita visitar virtualmente Tidmarsh Farms desde cualquier ordenador conectado a Internet. En este caso, se muestra una representación digital de la topografía del pantanal, con árboles y vegetación. El motor de videojuegos añade ruidos e incorpora los datos tomados por los sensores del pantanal. El sonido de la red de micrófonos se mezcla y se funde según la posición virtual del usuario, quien podrá elevarse por encima de la ciénaga y oír de inmediato todo lo que sucede, escuchar qué ocurre en una pequeña zona, o bucear y oír el sonido grabado por los hidrófonos. Un viento virtual generado a partir de datos tomados en tiempo real desde el lugar de observación soplará a través de los árboles digitales.

Aunque el Observatorio Viviente es más un proyecto de demostración que un prototipo con fines prácticos, no resulta difícil imaginar sus aplicaciones. Los agricultores podrían beneficiarse de un sistema similar para controlar los movimientos de humedad, plaguicidas, abonos o incluso animales en sus tierras de cultivo. En una ciudad, los organismos municipales podrían emplear tales técnicas para vigilar cómo evoluciona una tormenta o una inundación durante las labores de ayuda y rescate. Y no hace falta un gran esfuerzo para aventurar aplicaciones en nuestra vida cotidiana. Muchos de nosotros ya buscamos restaurantes en Yelp antes de salir. Llegará un día en que podremos ver qué ambiente reina en un restaurante (¿está abarrotado o vacío ahora mismo?) antes de cruzar la ciudad.

En última instancia, esta presencia remota podría acabar convirtiéndose en un sucedáneo del teletransporte. En ocasiones, nosotros mismos hemos usado DoppelLab para conectar con el laboratorio cuando nos encontramos de viaje, ya que oír sus ruidos y contemplar su actividad nos hace sentir un poco más cerca de casa. Del igual modo, un viajero podría proyectarse hacia su hogar para pasar un rato con su familia desde la distancia.

SENTIDOS AUMENTADOS

Podemos apostar con toda seguridad que la tecnología ponible, aquella incorporada en nuestra ropa y complementos, dominará la siguiente oleada de desarrollo informático. En nuestra opinión, ello brinda una oportunidad única para interaccionar de un modo mucho más natural con los datos de sensores. A efectos prácticos, de hecho, los ordenadores ponibles podrían convertirse en prótesis sensoriales.

Hace tiempo que se investiga la posibilidad de acoplar sensores y actuadores en el cuerpo humano con fines asistenciales. Para ello, las señales eléctricas procedentes de los sensores se incorporan a los canales sensoriales del individuo, un proceso conocido como «sustitución sensorial». Las investigaciones recientes sugieren que la neuroplasticidad (la capacidad de nuestro cerebro para adaptarse físicamente a nuevos estímulos) podrá facultarnos para percibir estímulos «extrasensoriales» a través de los canales que ya poseemos. Con todo, aún queda un largo camino por recorrer para salvar la brecha que hoy separa

los datos procedentes de sensores electrónicos y la experiencia sensorial humana.

Creemos que una clave para liberar el potencial de las prótesis sensoriales pasa por una mejor adecuación al estado de atención del portador. En la actualidad, los dispositivos ponibles más avanzados, como Google Glass, no dejan de comportarse como una tercera persona que nos susurra al oído información relevante en un contexto dado; por ejemplo, al recomendarnos una película cuando pasamos frente a un cine. Pero tales sugerencias se producen de repente. A menudo resultan perturbadoras e incluso molestas, algo que no ocurre con nuestros verdaderos sentidos. Estos nos permiten conectar y desconectar con gran dinamismo, prestando atención a un estímulo cuando hace falta, pero dejando que nos concentremos en nuestras tareas en caso contrario. Así pues, hemos diseñado varios experimentos para averiguar si un ordenador ponible podría imitar esa facultad de nuestro cerebro para concentrarnos en una tarea sin perder por ello una conexión preatencional con el entorno.

El día en que los sensores y los ordenadores nos permitan hacer viajes virtuales a entornos lejanos, conceptos como *aquí* y *ahora* adquirirán nuevos significados

Nuestro primer experimento determinará si un dispositivo ponible puede captar las fuentes sonoras que está escuchando un usuario en un momento dado. Con esa información, nos gustaría diseñar un aparato que permitiese al portador sintonizar con los micrófonos e hidrófonos de Tidmarsh Farms igual que si se tratase de fuentes sonoras naturales. Imagine que, sin más que concentrarse en una isla lejana, pudiese de repente percibir sus sonidos, como si sus oídos fuesen tan agudos que le permitiesen salvar la distancia. O que, al caminar por la orilla de un riachuelo, pudiese oír qué sucede bajo el agua o dirigir la vista hacia la copa de los árboles y escuchar el canto de los pájaros que se encuentran en lo alto.

Esa manera de proporcionar información digital podría marcar el principio de una conexión fluida entre nuestros sistemas sensoriales y los datos de una red de sensores. Es probable que, antes o después, semejante conexión sea posible por medio de implantes neurales o sensoriales. Esperamos que estos dispositivos, así como la información que provean, se integren en nuestros sistemas de procesamiento sensorial en lugar de desplazarlos.

¿SUEÑO O PESADILLA?

Para muchas personas, entre las que nos contamos nosotros, un mundo como el que acabamos de describir resulta potencialmente aterrador. Una nueva noción de presencia modificaría nuestra relación con el entorno y nuestros semejantes. Más preocupante aún son las tremendas implicaciones sobre la privacidad. Con todo, creemos que existen múltiples formas de establecer salvaguardas en nuestra relación con la tecnología.

Hace una década, en uno de los proyectos de nuestro grupo, Mat Laibowitz desplegó 40 cámaras y sensores en el laboratorio. Dotó a cada dispositivo de un enorme interruptor de control para que pudiera desactivarse con facilidad y sin ambigüedades. En la actualidad, sin embargo, hay ya demasiadas cámaras, micrófonos y otros sensores para que alguien los desactive. Tendremos que arbitrar otras soluciones.

Un método consiste en hacer que los sensores respondan al contexto y a las preferencias de cada persona. Hace unos años, cuando trabajaba en nuestro grupo, Nan-Wei Gong exploró una idea similar. Diseñó un llavero que emitía una señal inalámbrica que informaba a los sensores próximos sobre las preferencias de privacidad del usuario. Cada aparato disponía de un gran interruptor rotulado *No*. Al pulsarlo, todos los sensores a su alcance quedaban bloqueados para transmitir información relativa al usuario, lo que le proporcionaba un espacio de total privacidad.

Cualquier solución deberá garantizar que todos los sensores próximos a un individuo reciben y acatan tales peticiones. Es cierto que el diseño de protocolos de este tipo se enfrentará a numerosos desafíos técnicos y legales. No obstante, varios grupos de investigación de todo el mundo están estudiando cómo resolver el problema. Por ejemplo, mediante disposiciones legales que otorguen a una persona la propiedad o el control de los datos generados en su proximidad, de modo que pueda decidir si encripta o restringe la introducción de esos datos en la red. Uno de los objetivos que persiguen tanto DoppelLab como el Observatorio Viviente pasa por descubrir cómo evolucionan las limitaciones a la privacidad en un entorno por lo demás seguro, como un centro de investigación abierto.

A medida que se revelen posibles prácticas siniestras, podremos idear soluciones. Como ha demostrado el caso de las recientes revelaciones del exagente de la NSA Edward Snowden, la transparencia es crítica. Las amenazas a la privacidad han de tratarse a través de la legislación en un foro abierto. Por lo demás, creemos que el desarrollo de programas y dispositivos de código abierto constituye la mejor defensa contra las invasiones sistémicas de la privacidad.

Mientras tanto, podemos comenzar a considerar qué clase de nuevas experiencias nos aguardarán en un mundo gobernado por sensores. Las perspectivas nos entusiasman. Creemos perfectamente posible desarrollar técnicas y dispositivos que se integren en nuestro cuerpo y nuestro entorno. Estas herramientas apartarían nuestra mirada de la pantalla de los teléfonos inteligentes y la devolverían a lo que nos rodea. En lugar de reducir nuestra presencia en el mundo, la aumentarían.

PARA SABER MÁS

Rainbow's end. Vernor Vinge. Tor Books, 2006.
Metaphor and manifestation: Cross reality with ubiquitous sensor/actuator networks. Joshua Lifton et al. en *IEEE Pervasive Computing*, vol. 8, n.º 3, págs. 24-33, julio-septiembre de 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ordenador del siglo XXI. Mark Weiser en *IyC*, noviembre 1991.
Nuevas concepciones de la privacidad. Jaron Lanier, *IyC* enero de 2014.



Las burbujas gigantes de la Vía Láctea

Se han descubierto dos lóbulos de radiación electromagnética que se extienden decenas de miles de años luz sobre el disco de la Vía Láctea. Su origen sigue siendo un misterio

Douglas Finkbeiner, Meng Su y Dmitry Malyshev



Douglas Finkbeiner es profesor de física y astronomía y miembro del Instituto de Teoría y Computación del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard.

Meng Su es investigador posdoctoral de los programas Pappalardo y Einstein en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y en el Instituto Kavli de Astrofísica e Investigación Espacial, también en el MIT.

Dmitry Malyshev trabaja como investigador posdoctoral en la Universidad Stanford y en el laboratorio SLAC. Forma parte del equipo a cargo del instrumento LAT del telescopio Fermi.



EN NOCHES DESPEJADAS, LEJOS DE LAS LUCES DE LA CIUDAD, PUEDE VERSE EN EL CIELO UNA hermosa estructura en forma de arco: nuestra galaxia, la Vía Láctea. Desde la antigüedad, el ser humano se ha maravillado con las oscuras nubes de polvo que se recortan contra el fondo lechoso. Hace apenas cuatro siglos, Galileo apuntó con su telescopio al firmamento y descubrió que esa «leche» era, en realidad, la luz de innumerables estrellas.

Nuestra concepción de la arquitectura de la Vía Láctea acaba de sufrir otro cambio. Gracias a un nuevo telescopio, los autores de este artículo y otros colaboradores hemos descubierto dos lóbulos de luz colosales, los cuales se elevan miles de años luz sobre el centro galáctico. La razón por la que han pasado inadvertidos durante tanto tiempo se debe a que brillan, sobre todo, en rayos gamma, radiación electromagnética de alta energía que no atraviesa la atmósfera.

Ignoramos qué puede haber generado estas «burbujas de Fermi», como las hemos denominado. Su origen parece asociado a los violentos procesos que acontecen en el centro de nuestra galaxia, una región caótica en la que un agujero negro supermasivo agita remolinos de gas caliente y donde florecen las supernovas.

Como ocurre a menudo con los hallazgos inesperados, encontramos las burbujas de Fermi casi por accidente. Pero, ahora que sabemos de su existencia, hemos comenzado a explorar con meticulosidad sus características. Estas burbujas gigantes prometen revelar secretos profundos acerca de la estructura y la historia de la Vía Láctea.

DESCUBRIMIENTO SORPRESA

El primer indicio de que algo fuera de lo común acontecía en nuestra galaxia no lo aportaron los rayos gamma, sino las microondas. Corría el año 2003 cuando uno de los autores de este artículo (Finkbeiner) trataba de entender mejor las propiedades del universo primitivo a partir de los datos de la sonda WMAP, de la NASA; por aquella época, el satélite cosmológico más reciente y avanzado. Como investigador posdoctoral en la Universidad de Princeton, mi tarea consistía en estudiar la manera en que el polvo interestelar cercano enmascaraba la señal que pretendía medir WMAP: las microondas del tenue resplandor residual de la gran explosión que dio origen a nuestro universo. El polvo galáctico reviste su propio interés; pero, para un cosmólogo, es como un rasguño en la lente de un telescopio: algo cuyo efecto debe sustraerse de los datos.

Sin embargo, la contaminación debida al polvo no era lo único que había que eliminar. Dado que los cosmólogos estamos obligados a observar el universo desde el interior de la Vía Láctea, también tenían que sustraerse las señales de microondas emitidas por las partículas de alta energía que atraviesan la galaxia. Aunque en 2003 ese tipo de señal ya se conocía con cierto detalle, había algo que no encajaba. Logré modelizar la mayor parte de la emisión galáctica, pero, cuando trataba de sustraer la señal procedente del interior de la Vía Láctea, siempre persistía algo. Bauticé ese residuo como «bruma de microondas».

Aunque no existía ninguna explicación para aquella misteriosa señal, los astrónomos se aprestaron a idear algunas. La posibilidad más emocionante era que dicha bruma constituyese un indicio de materia oscura. La naturaleza de esta enigmática sustancia constituye un verdadero misterio: solo se sabe que interacciona con la materia ordinaria por medio de la gravedad. Por ello, se espera que el centro de la galaxia arrastre hacia sí grandes cantidades de materia oscura, lo que generaría una densa nube. De tanto en tanto, en su interior deberían producirse

EN SÍNTESIS

Hace poco, el telescopio espacial Fermi reveló la existencia de dos enormes burbujas de rayos gamma que se elevan miles de años luz sobre el centro de la Vía Láctea.

Aunque los astrónomos aún ignoran qué procesos dieron lugar a estas burbujas, su origen parece ligado a fenómenos muy violentos ocurridos recientemente en nuestra galaxia.

Existen dos explicaciones principales: un chorro de alta energía procedente del agujero negro supermasivo que ocupa el centro de la Vía Láctea, o el viento acumulado de un enjambre de supernovas.

ILUSTRACIONES DE RON MILLER

colisiones entre partículas de materia oscura, un proceso que podría emitir electrones y positrones.

Aunque seamos incapaces de detectar la materia oscura por medios directos, esos electrones y positrones sí deberían poder verse: al serpentear entre la maraña de campos magnéticos del centro de la galaxia, tales partículas emitirían radiación de sincrotrón, la luz que radian las partículas con carga eléctrica cuando se ven obligadas a cambiar de dirección.

Así pues, cabía la posibilidad de que la bruma de microondas que habíamos detectado se debiese, en última instancia, a una gran nube de materia oscura emplazada en el centro de la galaxia. Pero ¿cómo comprobarlo? Además de producir radiación de sincrotrón en forma de microondas, los mismos electrones tendrían que provocar otro efecto: al colisionar contra los fotones del medio, deberían comunicarles una energía muy elevada, un proceso conocido como «efecto Compton inverso».

Pronto llegamos a un consenso: si la bruma de microondas era producida por electrones de alta energía, también deberíamos observar rayos gamma muy energéticos. Así pues, recurrimos al telescopio espacial Fermi, diseñado para observar rayos gamma desde el espacio. Sus datos se hicieron públicos el 24 de agosto de 2009. Para entonces me había convertido en profesor universitario y tenía a mi cargo a Gregory Dobler, un investigador posdoctoral. Juntos nos apresuramos a confeccionar nuestros primeros mapas de rayos gamma de la galaxia. Tras largos días de trabajo comprobamos que, desde el interior de la Vía Láctea, manaba un pequeño exceso de rayos gamma que parecía asociado a la bruma de microondas. Junto con otros investigadores, escribimos un artículo en el que argumentábamos a favor de una relación entre ambas señales. En nuestra opinión, una y otra probablemente se debiesen a una concentración de electrones de alta energía en el centro de la galaxia, si bien no llegamos a especular sobre el origen de dichos electrones.

El siguiente paso se hizo esperar un poco más. En octubre de 2009, mientras analizaba los nuevos datos publicados por Fermi para rehacer algunas de las figuras de nuestro primer artículo, me percaté de que, en los datos originales, la emisión de rayos gamma mostraba «bordes»: límites bien definidos en los que la señal caía en picado. En astronomía, esa clase de fronteras abruptas suelen deberse a sucesos transitorios. Una supernova, por ejemplo, puede producir una onda de choque, la cual exhibirá un filo bien delimitado. Con el tiempo, esas aristas tienden a suavizarse y desvanecerse.

Si los rayos gamma hubiesen sido generados por una gran nube de materia oscura, la señal tendría que haber disminuido de manera gradual a medida que se alejaba del centro de la galaxia. La aniquilación de materia oscura habría tenido lugar a lo largo de miles de millones de años, por lo que cualquier borde se habría disipado hace mucho tiempo.

En la primera tanda de datos, los bordes parecían tan poca cosa que simplemente los atribuimos al ruido de la señal. Sin embargo, el fenómeno persistía en los nuevos datos. Se los mostré a mis entonces estudiantes de doctorado Meng Su y Tracy Slatyer, y ambos convinieron en que se trataba de un efecto real. A partir de entonces, Su se involucró de lleno en la investigación y comenzó a trabajar en el problema —diría que prácticamente sin dormir— para deducir la forma exacta de los bordes. En cuestión de días, nuestra opinión sobre lo que reflejaban los datos cambió de manera radical: adiós a la materia oscura, bienvenidas las burbujas. En mayo de 2010, junto con Su y Slatyer, enviamos un artículo al *Astrophysical Journal* en el que describíamos las estructuras que denomina-

GREG MAXSON

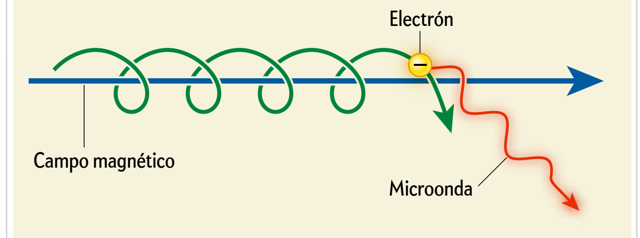
FUNDAMENTOS

Guía práctica de la radiación cósmica

Cuando se observa radiación electromagnética proveniente del espacio, identificar la fuente requiere reconstruir el proceso de emisión. Los tres fenómenos mencionados aquí fueron considerados para examinar las burbujas de Fermi.

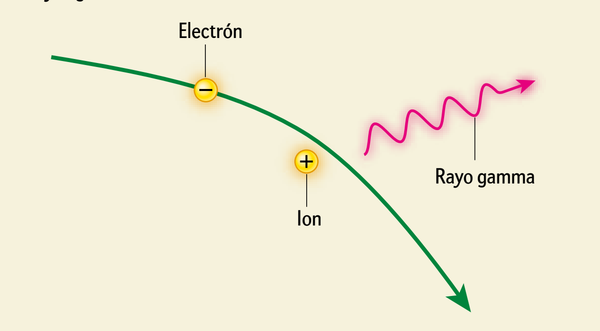
Radiación de sincrotrón

Cuando una partícula con carga eléctrica cambia la dirección de su movimiento, se emite radiación electromagnética. Los campos magnéticos del centro de la Vía Láctea provocan que los electrones describan círculos; la luz emitida en el proceso recibe el nombre de radiación de sincrotrón. En la galaxia, esta consta principalmente de microondas.



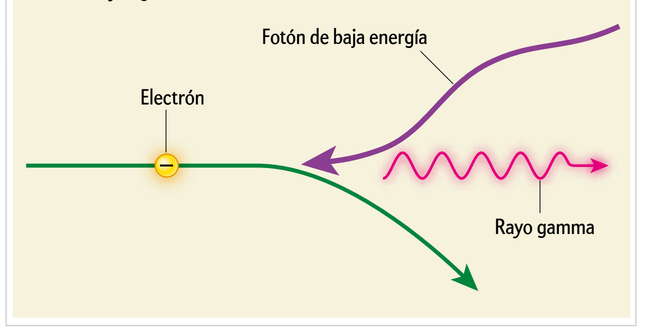
Bremsstrahlung

Cuando un electrón de alta energía pasa cerca de otra partícula con carga eléctrica, a menudo reduce su velocidad. La energía perdida en el proceso se convierte en fotones que se alejan del electrón en forma de *Bremsstrahlung*, o «radiación de frenado». En la galaxia, esta emisión tiene lugar en forma de rayos gamma.



Efecto Compton inverso

Un electrón que se desplaza a través del medio intergaláctico puede colisionar de frente contra un fotón. Al igual que ocurre con una pelota de tenis que choca contra una raqueta bien empuñada, esos fotones salen disparados con una energía mayor que la que traían. Dichos «raquetazos» emiten también rayos gamma.



mos «burbujas de Fermi», en honor al telescopio con el que las habíamos descubierto.

BURBUJAS CÓSMICAS

Aunque nadie esperaba encontrar esas dos burbujas de rayos gamma que se proyectaban decenas de miles de años luz sobre el disco de la galaxia, tal vez el hallazgo no tenía por qué haber causado tanta sorpresa. Otras galaxias también muestran burbujas similares: podemos verlas en rayos X y ondas de radio. Y, si contásemos con mejores telescopios de rayos gamma, probablemente también apareciesen en dicho intervalo de frecuencias.

Sabemos qué procesos generan las burbujas en muchas de esas galaxias. En algunos casos, su origen guarda relación con el agujero negro supermasivo que, con una masa que puede llegar a superar en miles de millones de veces la del Sol, suele «anclar» el centro de las grandes galaxias. A medida que el gas y el polvo caen hacia el agujero negro, se forma un remolino caliente que genera intensos campos magnéticos. Estos, a su vez, producen chorros de partículas (rayos cósmicos) y radiación, los cuales pueden «inflar» las burbujas.

También el centro de la Vía Láctea alberga un agujero negro supermasivo; sin embargo, nunca hemos visto que de él emane un chorro de radiación (ya que, si existe uno, gracias a Dios no apunta en nuestra dirección), por lo que no disponemos de pruebas directas de que dicho proceso infle las burbujas de Fermi.

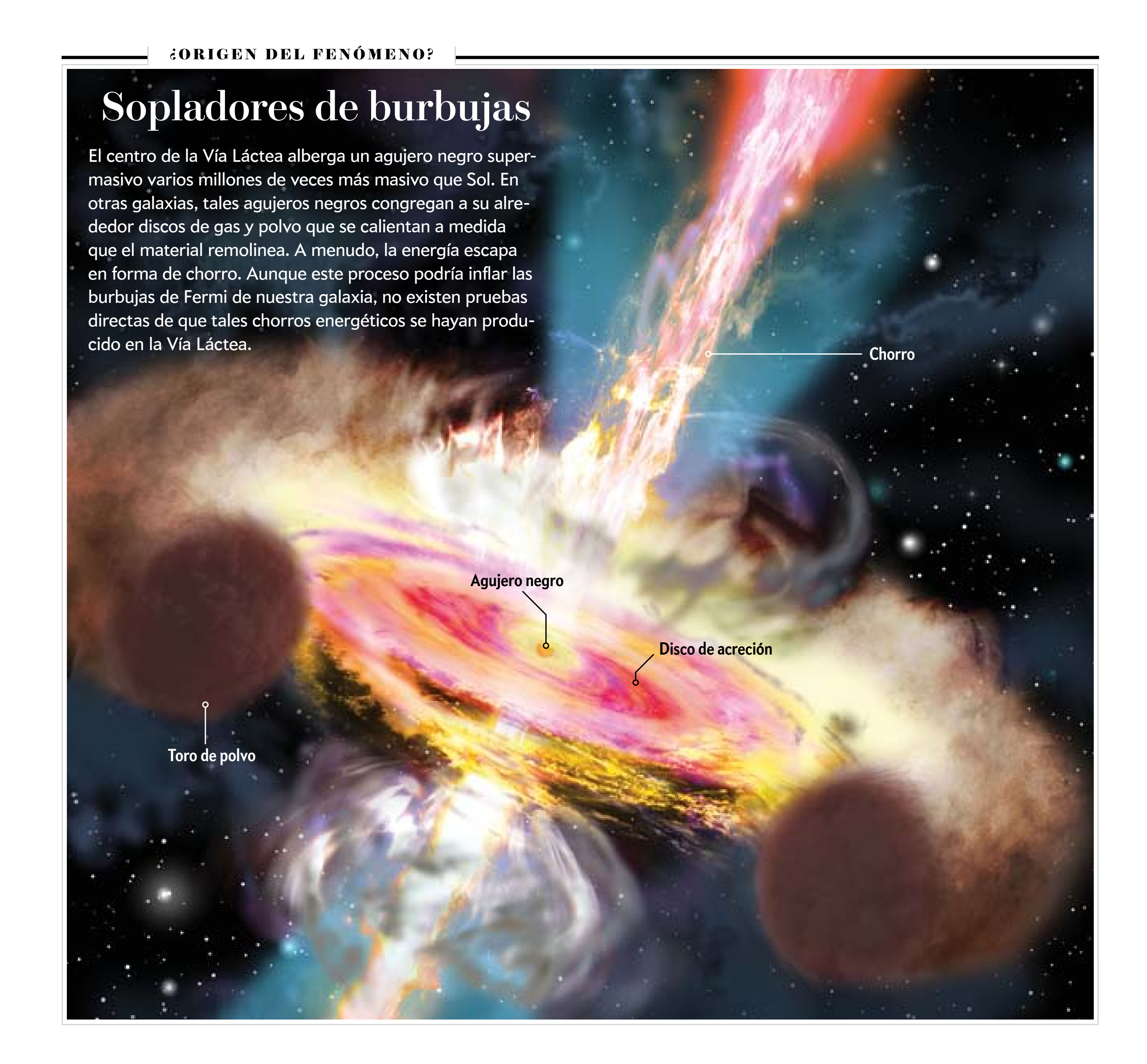
Por otro lado, a gran altura sobre el centro de la galaxia existe una extensa nube de gas: la corriente de Magallanes. Si un chorro de radiación apuntara allí, arrancaría temporalmente electrones de los átomos de la nube. Después, cuando los electrones y los iones se recombinasen, emitirían radiación.

Eso es exactamente lo que han observado los astrónomos. Puede que, hace cerca de un millón de años, un intenso episodio de acreción en el agujero negro central de nuestra galaxia generase chorros de alta energía y radiación ultravioleta y que estos colisionasen contra la corriente de Magallanes. Dicho fenómeno podría haber engendrado las burbujas de Fermi.

¿ORIGEN DEL FENÓMENO?

Sopladores de burbujas

El centro de la Vía Láctea alberga un agujero negro supermasivo varios millones de veces más masivo que Sol. En otras galaxias, tales agujeros negros congregan a su alrededor discos de gas y polvo que se calientan a medida que el material remolinea. A menudo, la energía escapa en forma de chorro. Aunque este proceso podría inflar las burbujas de Fermi de nuestra galaxia, no existen pruebas directas de que tales chorros energéticos se hayan producido en la Vía Láctea.



El universo en rayos gamma

La atmósfera terrestre bloquea los rayos gamma (radiación electromagnética miles de millones de veces más energética que la luz visible, por lo que su medición requiere emplear instrumentos espaciales. El telescopio Fermi es el observatorio espacial de rayos gamma más potente lanzado hasta la fecha. Contiene dos instrumentos principales: un «monitor de estallidos», que vigila todo el cielo en busca de explosiones transitorias de rayos gamma, y el Telescopio de Gran Área (LAT, por sus siglas en inglés).

El LAT difiere por completo de cualquier telescopio óptico. Carente de espejos, lentes o plano focal, funciona más bien como un experimento de física de partículas. Cada rayo gamma incidente colisiona con un núcleo atómico del material detector y se desintegra en un positrón y un electrón. El seguimiento de estas partículas se lleva a cabo mediante instrumentos de a bordo y un calorímetro, que mide su energía. El análisis de los datos, realizado desde la Tierra, elimina el ruido de fondo y permite deducir la dirección y la energía del rayo incidente. Los datos se encuentran a disposición del público.

La mayoría de los telescopios solo pueden observar una pequeña fracción del cielo en cada momento, por lo que los astrónomos ponen sumo cuidado a la hora de elegir qué regiones escudriñar. El tiempo de uso de un telescopio provoca una competencia feroz entre los investigadores y, en general, no resulta factible observar grandes porciones de cielo en las que no se espera que ocurra algo interesante. El campo de visión del telescopio Fermi, en cambio, cubre una quinta parte del cielo, lo que le permite observar todo el firmamento cada tres horas. Esta cobertura sin precedentes brinda a los expertos la posibilidad de descubrir fenómenos que, de otro modo, pasarían desapercibidos.

En otras galaxias, las burbujas aparecen como un subproducto de los intensos procesos de formación estelar que acontecen en su centro. En un vivero estelar nacen estrellas de tamaños muy diversos. Cuanto más masivos son estos astros, tanto más deprisa queman su combustible nuclear. Al agotarse, el núcleo de la estrella colapsa y libera una enorme cantidad de energía, lo que da lugar a una explosión de supernova que arranca las capas exteriores de la estrella y deja tras sí una estrella de neutrones o un agujero negro. El «viento» de partículas emitido por estas supernovas bien podría inflar las burbujas en torno al centro de la galaxia.

Sabemos que el centro de la Vía Láctea también ha sido un vivero estelar muy activo. En las inmediaciones del agujero negro central hay varios miles de estrellas que apenas cuentan unos seis millones de años de edad, lo que, en escalas cósmicas, equivale a la más tierna infancia de un astro. Sin embargo, si en esa misma zona hubieran llegado a formarse estrellas muy, muy masivas, en seis millones de años habrían tenido tiempo para convertirse en supernovas. Esas explosiones habrían despedido un viento de gas caliente que tal vez haya bastado para inflar las burbujas.

PRÓXIMOS PASOS

Como vemos, la historia de las burbujas de Fermi se encuentra íntimamente ligada a la historia y la evolución de la Vía Láctea. El fenómeno también podría ayudarnos a entender la física que esconden algunos procesos de interés, como la acreción de materia por parte de un agujero negro o la interacción entre los rayos cósmicos de alta energía y el gas interestelar. Aunque existen estructuras similares en otras galaxias, las burbujas de Fermi nos brindan la oportunidad de estudiar tales fenómenos mucho más de cerca.

Ahora estamos intentando observar las burbujas en todo el espectro electromagnético. Uno de los resultados más sorprendentes es que, aunque los lóbulos se muestran gigantescos en rayos gamma, resultan casi invisibles en otras frecuencias. Esperamos que los nuevos datos del satélite Planck, encargado de cartografiar todo el cielo en microondas, proporcionen pistas útiles al respecto. También estamos tratando de trazar un mapa de las burbujas en rayos X, si bien este propósito se ve dificultado por el hecho de que casi todos los satélites de rayos X cuentan con un campo de visión muy reducido. En términos simplificados, es como querer cartografiar una cadena montañosa escudriñando el paisaje a través de un rollo de papel de cocina.

Después de que Galileo descubriese que la Vía Láctea estaba hecha de estrellas, hubieron de pasar tres siglos para que los astrónomos se percatasen de que nuestra galaxia no era sino una de miles de millones. Con un poco de suerte, no necesitaremos tanto tiempo para entender la verdadera importancia de las burbujas de Fermi.

PARA SABER MÁS

Giant gamma-ray bubbles from Fermi-LAT: Active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind? Meng Su et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 724, n.º 2, págs. 1044-1082, 1 de diciembre de 2010.
Telescopio espacial de rayos gamma Fermi: **fermi.gsfc.nasa.gov**

EN NUESTRO ARCHIVO

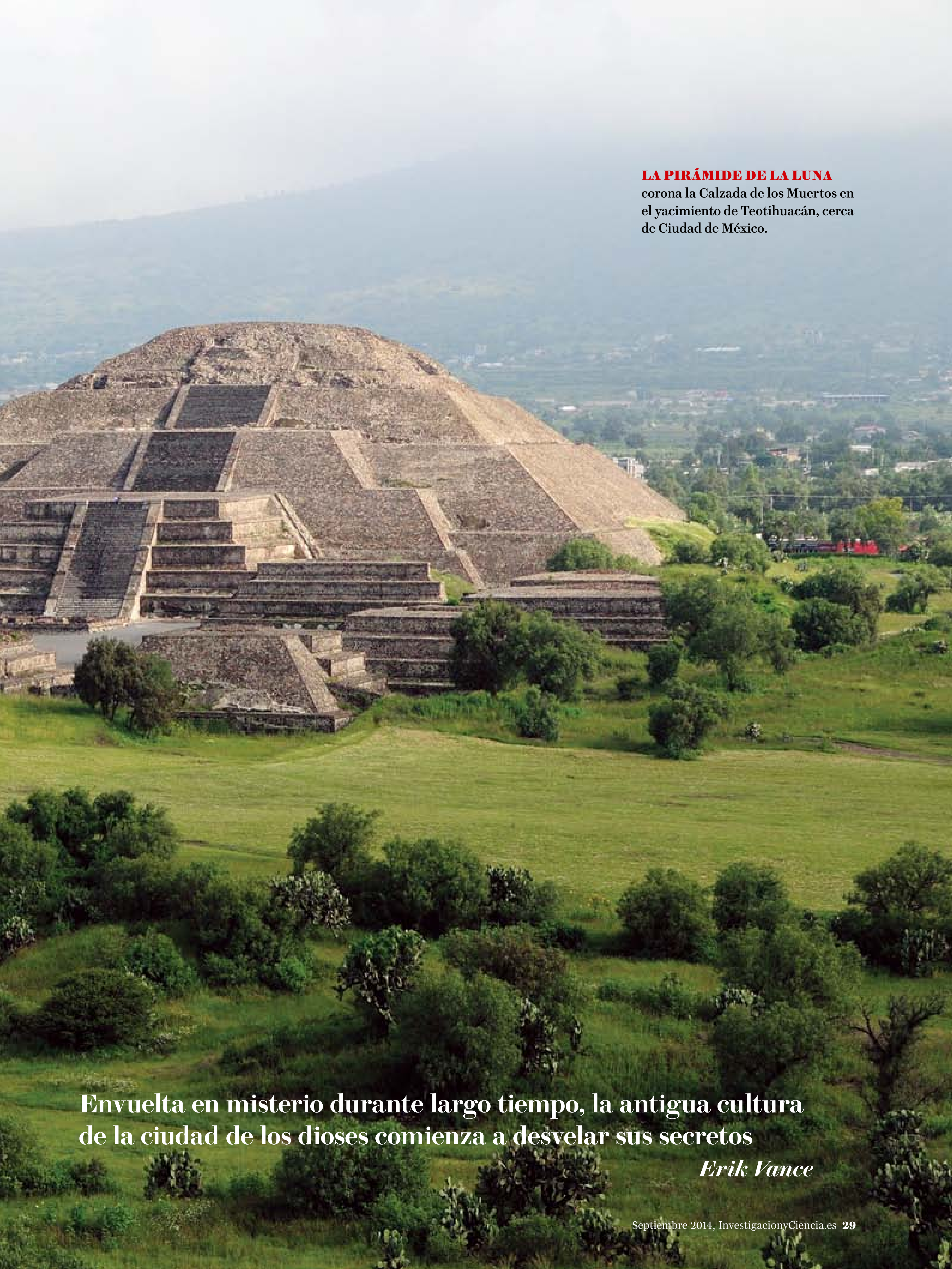
Una ventana abierta a los confines del universo. William B. Atwood, Peter F. Michelson y Steven Ritz en *IyC*, febrero de 2008.

GREG MAXSON



ARQUEOLOGÍA

Organización política y social en Teotihuacán



LA PIRÁMIDE DE LA LUNA corona la Calzada de los Muertos en el yacimiento de Teotihuacán, cerca de Ciudad de México.

Envuelta en misterio durante largo tiempo, la antigua cultura de la ciudad de los dioses comienza a desvelar sus secretos

Erik Vance

Erik Vance es periodista científico radicado en Ciudad de México.





En algún momento del siglo XIV, un mexica dirigió por primera vez sus pasos al valle de Teotihuacán. Recién llegados a la región, los mexicas (hoy erróneamente más conocidos como aztecas) integraban un pueblo agresivo y ambicioso procedente del norte que, en poco tiempo, se convirtió en la fuerza dominante del altiplano mexicano. Conquistaron el territorio y se asentaron en la poderosa ciudad de Tenochtitlán, que pronto gobernaría un extenso imperio desde la que hoy es Ciudad de México. Imaginemos a aquel primer destacamento de hombres, audaz e invencible como la superpotencia emergente a la que pertenecían, adentrándose en un territorio verde y exuberante rodeado por suaves colinas. Guerreros que han escuchado las leyendas de las tribus toltecas sobre un lugar en las montañas, a unos 40 kilómetros de su nuevo hogar, en el que una vez habitaron los dioses. Entonces, tras un recodo, su bravuconería se torna en asombro cuando esa morada de los dioses se impone en el horizonte. Ruinas de pirámides de hasta veinte pisos —tan grandes que, en un principio, las confunden con colinas— se alinean a lo largo de una enorme calzada. Por dondequiera que los exploradores miren se extienden templos en ruinas, mercados y reliquias de una civilización largo tiempo extinta y sin nombre, sin escritura y sin historia. Una enorme ciudad antaño gloriosa hasta lo inimaginable y ahora abandonada.

Los mexicas diseñaron Tenochtitlán remedando aquella ciudad fantasma y convirtieron sus ruinas en una suerte de lugar de veraneo para la élite. Bautizaron la antigua avenida como Calzada de los Muertos y llamaron a sus dos grandes monumentos Pirámide del Sol y de la Luna, respectivamente. A la vieja ciudad la llamaron Teotihuacán: el lugar donde nacen los dioses.

Unos dos siglos más tarde, en 1521, los conquistadores españoles derrocaron al Imperio mexica. Durante cientos de años, Teotihuacán se sumió en un lento deterioro. Cuando los arqueólogos comenzaron a tomarse en serio las excavaciones, sabían tan poco como los propios mexicas sobre los constructores de la ciudad. Muchos pensaron que era un asentamiento pequeño, erigido por tribus dispersas que, después, habrían sido absorbidas por invasores. Hoy, sin embargo, los especialistas saben que Teotihuacán fue mucho más antigua e importante de lo que ninguno de los primeros estudiosos llegó a imaginar. Constituyó el corazón de un imperio inmenso, anterior a todas las civilizaciones del altiplano y cuya extensión alcanzó 1200 kilómetros. Una ciudad que rivalizó, y quizás incluso dominó, a los poderosos reinos mayas de las actuales Guatemala y Honduras.

Pero, sin textos escritos, resulta muy difícil reconstruir el modo de vida de los teotihuacanos. Tras acceder a los edificios por medio de túneles y excavar otras estructuras menores cercanas a estos, los arqueólogos han elucubrado algunas explicaciones. Conjeturan una sociedad floreciente y multiétnica, con estratos sociales acaudalados, de la que formaban parte mercaderes, comerciantes y artesanos procedentes de todas partes de México.

Sin embargo, aún mayor es nuestra ignorancia sobre el sistema político de Teotihuacán, una cuestión sobre la que han surgido dos escuelas de pensamiento. Una imagina una ciudad gobernada por un rey belicoso, indiscutido e infalible que administraba su poder con puño de hierro. La otra concibe una nación mercantil en la que varias familias rivalizaban por el poder y que, incapaces de acaparar el control supremo, practicaban un delicado juego político. Ambas teorías compiten por zanjar el debate y resolver el rompecabezas. Más allá de las divergencias, hay algo en lo que todos están de acuerdo: Teotihuacán no fue el lugar donde nacieron los dioses, sino donde los hombres los crearon con sangre y piedra para, después, dejar que se derrumbaran.

EN SÍNTESIS

Los arqueólogos llevan décadas intentando desentrañar los misterios de la antigua ciudad mexicana de Teotihuacán. Hasta ahora, las respuestas se han mostrado esquivas.

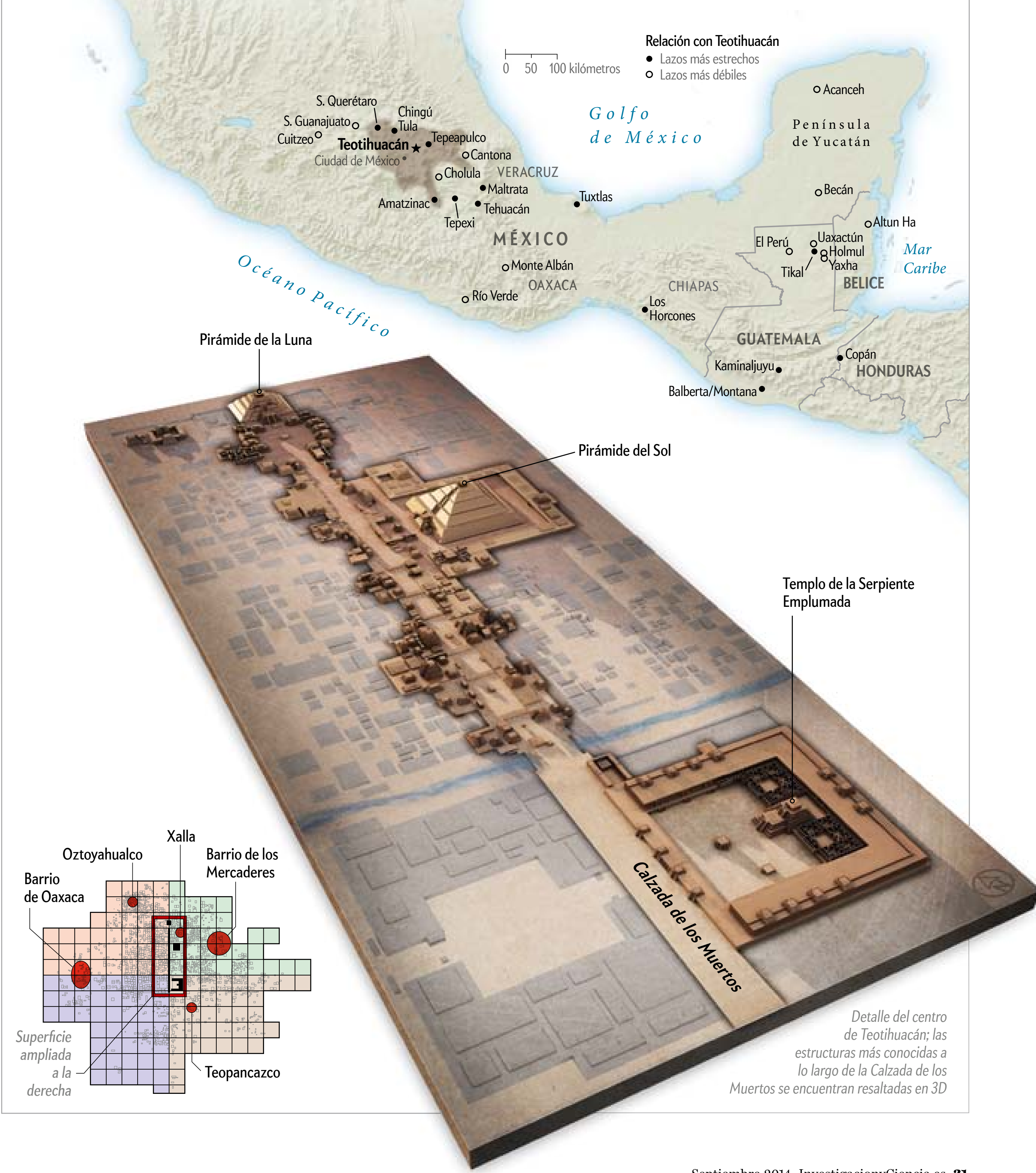
Varios descubrimientos recientes han aportado nuevas pruebas sobre la vida que llevaban sus gentes y la extensión de su imperio. Al hacerlo, se ha encendido el debate sobre su sistema político.

Una de las teorías sostiene que Teotihuacán estaba gobernado por un único rey todopoderoso; otra propone que varias familias de élite competían por el control de la ciudad.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES

Ciudad de dioses

Antaño considerado un asentamiento menor, hoy se sabe que la antigua ciudad de Teotihuacán constituyó el núcleo de un vasto imperio cuya influencia llegaba hasta la actual Honduras. Las excavaciones bajo los grandes monumentos del yacimiento y en estructuras cercanas menores, como las viviendas de los teotihuacanos, han comenzado a aportar nueva información sobre esta misteriosa metrópoli. La ciudad contaba con una población diversa que vivía en barrios étnicamente diferenciados. Esta característica ha suscitado un vivo debate sobre su forma de gobierno.



Detalle del centro de Teotihuacán; las estructuras más conocidas a lo largo de la Calzada de los Muertos se encuentran resaltadas en 3D

MAPAS DE XNR PRODUCTIONS; ILUSTRACIONES DE JOSÉ MIGUEL MAYO; FUENTES: BASADO EN TRABAJOS DE RENÉ MILLON (*todos los mapas*); *OBSIDIAN AND THE TEOTIHUACAN STATE: WEAPONRY AND RITUAL PRODUCTION AT THE MOON PYRAMID*, DE DAVID M. CARBALLO, CENTRO DE ARQUEOLOGÍA COMPARADA DE LA UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH E INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTROPOLÓGICAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2011 (*mapa de Mesoamérica*); «CORPORATE LIFE IN APARTMENT AND BARRIO COMPOUNDS AT TEOTIHUACAN, CENTRAL MEXICO», LINDA R. MANZANILLA EN *DOMESTIC LIFE IN PREHISPANIC CAPITALS: A STUDY OF SPECIALIZATION, HIERARCHY, AND ETHNICITY*, DIRIGIDO POR LINDA R. MANZANILLA Y CLAUDE CHAPDELAINE, MUSEO DE ANTROPOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN, 2009 (*mapa localizador en miniatura*)

UN REY ESCURRIDIZO

Reconstruir el sistema político de una cultura antigua no resulta tarea fácil. Supongamos que aterrizamos en Washington D.C. 1400 años después de su hundimiento e intentamos entender a sus gentes. ¿Veneraban a Abraham Lincoln? ¿Formaban un Estado militar? ¿Cuál de sus dirigentes o dioses vivía en el gran obelisco blanco? Estas son el tipo de preguntas que, desde hace treinta y cinco años, lleva haciéndose sobre Teotihuacán Saburo Sugiyama, de la Universidad de la Prefectura de Aichi, en Japón.

Tres grandes estructuras dominan el lugar: la Pirámide del Sol, la más alta; la Pirámide de la Luna, que sigue en altura y corona la Calzada de los Muertos, y, finalmente, otra aún menor y situada al mismo lado de la calzada que la Pirámide del Sol: el Templo de la Serpiente Emplumada (también conocida como Quetzalcoatl por su parecido con el dios mexica, probablemente inspirado en esta figura más antigua). A pesar de tratarse de la más pequeña de todas, numerosos expertos han sugerido que esta estructura era en realidad la más importante y la que alojaba a reyes o sacerdotes poderosos. Situada en el centro mismo de la ciudad original, consta de dos pirámides rodeadas por un complejo amurallado de poca altura.

En 1989, Sugiyama y Rubén Cabrera Castro, del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, desenterraron una pista clave para conocer la historia de Teotihuacán: dieciocho cuerpos tendidos cerca del templo, pertenecientes a víctimas de un sacrificio ritual. Poco después, al excavar un túnel bajo el santuario, los investigadores descubrieron algunos cuerpos más, hasta un total de cien cadáveres. Varones en su mayoría, parecían guerreros de otras tierras, lo que sugiere una sociedad marcial en la que las leyes se hacían cumplir a golpe de cuchillo de obsidiana.

Sugiyama ha concebido una idea bastante concreta del tipo de lugar que fue Teotihuacán en su apogeo. Según él, un rey habría gobernado la ciudad con puño de hierro. «Esta ciudad se creó y se materializó con autoridad. No basta con sugerir ideas y decir "compañeros, vamos a construir unos cuantos edificios". Hay que convencer a la gente con autoridad», explica.

En un pueblo a las afueras de Teotihuacán, Sugiyama trabaja en un edificio que guarda más de dos millones de objetos encontrados durante las décadas que lleva excavando. En persona se muestra atento y reservado, y uno puede imaginarse al *hippie* trotamundos que fue en los años setenta, cuando dejó su Japón natal. Pero, cuando se trata de arqueología, es difícil encontrar a alguien más ambicioso y motivado.

En 1998, frustrado por no haber descubierto una tumba u otro indicio directo de sus reyes, Sugiyama decidió buscarlos excavando un túnel bajo la gigantesca Pirámide de la Luna. Aunque se trataba de un proyecto complicado, ofrecía el mejor modo de conocer la estructura de poder de aquella sociedad, así como un buen lugar para buscar una tumba. Como cualquier gran ciudad, Teotihuacán se construyó en etapas. Los antropólogos creen que, a partir del año 150 a.C., varios grupos se juntaron en un frondoso valle cercano y formaron una suerte de alianza. Levantaron la ciudad al azar, primero aquí y luego allá. El túnel de Sugiyama reveló que la Pirámide de la Luna fue una de las primeras grandes estructuras que se alzaron, allá por el año 100 de nuestra era.

Sin embargo, la pirámide no fue erigida de una vez. Entre 1998 y 2004, las excavaciones revelaron siete versiones previas, anidadas unas sobre otras como una matrioska. La cuarta, construida a principios del siglo III de nuestra era, según la datación por carbono, supuso un gran salto con respecto a la anterior.





LA ICONOGRAFÍA de Teotihuacán recurre con frecuencia a la serpiente emplumada (*arriba*) y al jaguar (*abajo*). Según una teoría, cuatro casas gobernaban la ciudad. La de la Serpiente Emplumada y la del Jaguar habrían sido las más poderosas.

CORY LANGELY, CORBIS (*serpiente emplumada*); WERNER FORMAN, GETTY IMAGES (*jaguar*)

Aquel fue un período de intenso crecimiento y, quizás, incluso el del nacimiento de un imperio.

Aunque Sugiyama aún no ha localizado a los reyes, sus hallazgos comienzan a encajar con nitidez en un relato que explica el auge de Teotihuacán como potencia. Fuera o no bajo un estandarte real, Teotihuacán fue creciendo al mismo tiempo que extendía sus tentáculos. A poco más de 700 kilómetros al sudoeste, en lo que hoy es Chiapas, se extienden las ruinas de Los Horcones, una pequeña ciudad que se desarrolló casi a la vez. A pesar de la distancia que la separa de Teotihuacán, Claudia García-Des Lauriers, arqueóloga de la Universidad Politécnica Estatal de California en Pomona que ha trabajado en el lugar, ve en él una huella indiscutible: «El hecho de que la zona de la plaza principal se diseñara para toda la colectividad, reproduciendo casi con exactitud la forma en que se baja la Calzada de los Muertos y se penetra en una gran plaza despejada, resulta muy llamativo. Es como si se estuviera tratando de invocar a Teotihuacán».

Se trata de parecidos sutiles pero llamativos para un ojo experto, asegura García-Des Lauriers. Dada su disposición y el estilo de su cerámica, Los Horcones debió ser un puesto militar o un estrecho socio comercial de Teotihuacán. Resulta muy curioso que la avenida que Garcia-Des Lauriers sospecha que imitaba la Calzada de los Muertos no lleve a ninguna parte: se interrumpe abruptamente en una gran roca. Algo así tendría sentido si quienes habían visitado la ciudad madre intentaban recrear una versión en miniatura de ella. «En realidad, habría

sido como La Meca para las sociedades islámicas», sostiene Sugiyama. «Probablemente hubo peregrinaciones.»

En los últimos años se han descubierto ciudades parecidas por todo México. Los expertos creen que Teotihuacán controló una región mucho más extensa de lo que cabía imaginar: una zona que cubría gran parte del actual sur de México y que llegaba hasta Honduras. A medida que se extendía su dominio, artículos como piedra caliza y plumas iban llegando desde los confines de Mesoamérica. De hecho, en la selva oriental, en una zona controlada por los legendarios reyes mayas, se han hallado referencias a una misteriosa ciudad situada en las montañas del oeste. No pocos sospechan que dichas descripciones remiten a Teotihuacán, cuyo control, al parecer, llegaba incluso a la gran urbe maya de Tikal, en Guatemala. Varias pruebas halladas en Copán, otra ciudad maya en Honduras, sugieren que una persona de Teotihuacán asesinó a su rey e instauró allí su propia ley.

Según Sugiyama, semejante imperio necesitaba un rey fuerte y carismático. Hacia el año 219 de nuestra era, este habría supervisado los monumentales proyectos de construcción y habría marcado el comienzo de un imperio que duraría cinco siglos.

En la cuarta versión de la Pirámide de la Luna, Sugiyama encontró una huella de ese imperio: los restos de doce humanos —probablemente prisioneros— y más de cincuenta animales, como lobos, jaguares y águilas, dispuestos con suma meticulosidad. El conjunto parece la representación de un mito de la Creación, con un manojo de cuchillos en forma de círculo, como un reloj de sol que apunta al norte. «De nuevo, pruebas fehacientes de que existía un Estado: decapitaciones y cuchillos», sostiene. «Y, de nuevo, sin el cuerpo de un gobernante.»

En las ruinas de las antiguas ciudades mayas, casi todos los edificios importantes albergan un rey bajo los escalones frontales o en el interior de la construcción, preservado con elegancia y acompañado de vasijas de especias y piedras preciosas. Pero, hasta hoy, nadie ha descubierto algo semejante en Teotihuacán.

¿MONARQUÍA U OLIGARQUÍA?

A pesar de todo, Sugiyama sigue convencido de que Teotihuacán era una monarquía al estilo del antiguo Egipto, con un mandatario divino a la cabeza y un aparato militar dedicado a mantener a raya a una ciudadanía multiétnica. Sin embargo, otros expertos proponen una teoría diferente. «Es imposible mantener una sociedad multiétnica estable si solo la gobierna una persona; los golpes de Estado se habrían sucedido una y otra vez», insiste la arqueóloga Linda R. Manzanilla, de la Universidad Nacional Autónoma de México. «Al contrario que el Imperio maya, Teotihuacán habría sido más bien una sociedad corporativa.»

A partir de sus propias excavaciones, Manzanilla sostiene que Teotihuacán no estaba gobernada por un líder supremo, sino por cuatro casas rivales. Si Sugiyama compara Teotihuacán con Egipto, la imagen que defiende Manzanilla vendría a asemejarse a la República de Roma: un Estado poderoso regido por un consejo de gobernantes. Así, los reyes de Teotihuacán habrían sido figuras decorativas controladas por las clases dirigentes. Estas pertenecerían a las cuatro casas que, en la iconografía de la ciudad, quedaban representadas por el coyote, la serpiente emplumada, el jaguar y el águila. Cada una dominaba un cuadrante de la ciudad y enviaba representantes a un edificio central de gobernación que contaba con una sección administrativa para cada una. La Serpiente Emplumada y el Jaguar habrían sido las más poderosas; por ello, los templos más ornamentados (la Pirámide del Sol y la de la Serpiente Emplumada) se alzaban en su mismo lado de la Calzada de los Muertos.

Tanto el equipo de Manzanilla como el de Sugiyama se acusan mutuamente de falta de fundamento. ¿Cómo es posible que dos personas que han dedicado décadas a investigar el mismo yacimiento lleguen a conclusiones tan distintas? En parte, puede que se deba a que cada uno ve Teotihuacán desde perspectivas muy diferentes. Mientras que Sugiyama ha dedicado su carrera a estudiar el equivalente al monumento de Washington, Manzanilla habría estado investigando el antiguo barrio residencial de la ciudad.

La imagen de Teotihuacán que defiende Manzanilla obedece a veinte años de investigaciones sobre las viviendas corrientes de la población. En los años noventa, la investigadora excavó Oztoyahualco, un complejo de viviendas de artesanos situado al noroeste de la ciudad, en la zona controlada por la casa del Águila. A diferencia de las infraestructuras mayas, que solo contaban con un santuario, este alberga varios y de tradiciones distintas. Para Manzanilla, este carácter multiétnico es lo que define a Teotihuacán, un lugar que solo podía prosperar porque los ricos propietarios de fuera de la ciudad controlaban los corredores de comercio y bienes que alimentaban el rápido crecimiento de la metrópoli. Con tantas facciones poderosas, habría sido muy difícil para un único tirano mantener a la población a raya. Manzanilla sostiene que, hacia el año 150, cuando se fundó la ciudad, ningún grupo tenía el monopolio de los recursos, como sí ocurrió con algunos de los dirigentes mayas. Los gobernantes de Teotihuacán habrían dependido de los impuestos de las diferentes provincias para construir su imperio. Como tal, cada «accionista» haría uso de ese poder. Aquellos que controlaban los territorios más ricos, como la casa de la Serpiente Emplumada, gozarían de una influencia mayor.

Ese tipo de gobierno —compartido por obligación— resultaba poco frecuente en el mundo antiguo, pero no inconcebible. No solo Roma y Grecia fueron repúblicas durante largo tiempo; también Mohenjo Daro, una antigua ciudad pakistaní del año 2000 a.C. situada en el valle del Indo, parece haber gobernado junto con Harappa, otro asentamiento. Y Tiwanaku, en Bolivia, compartió el poder con Wari, situada más al norte, hasta el año 1000 de nuestra era.

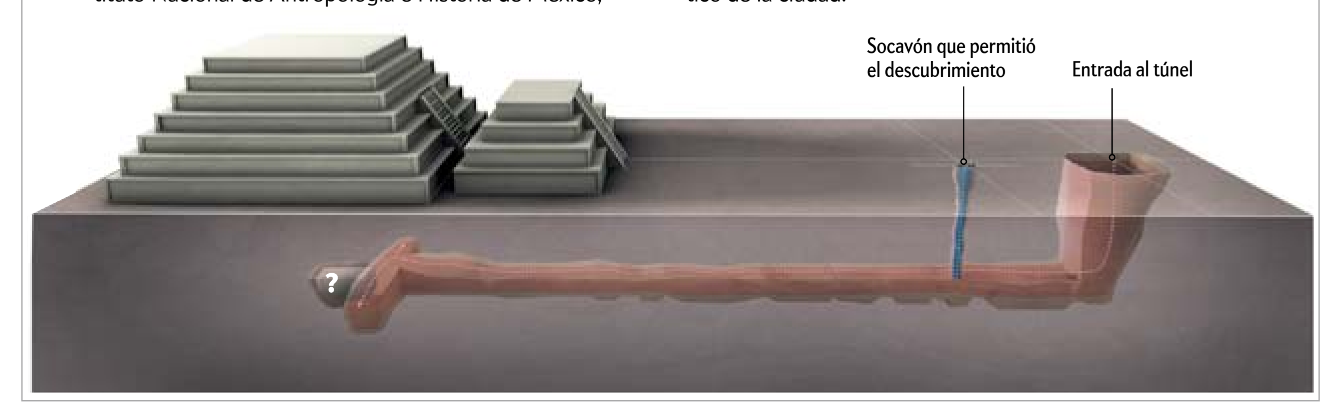
Sin embargo, una cosa es repartirse el mando con una ciudad a la que uno no puede vencer, y otra muy distinta hacer lo propio dentro de una misma urbe. Manzanilla admite que la mayoría de las civilizaciones antiguas solo tenían un gobernante. Aun así, opina que, en cualquier región, algunas culturas no tienen más remedio que experimentar con gobiernos corporativos. La prueba más poderosa a su favor, sin embargo, no se basa en nada que Manzanilla haya encontrado, sino en lo que nadie ha logrado hallar hasta ahora.

«¿Dónde está representado ese poderoso rey? ¿Dónde está enterrado? ¿Dónde está su palacio? ¿Pueden imaginar un lugar como Teotihuacán, con 125.000 personas, con un solo gobernante? Su vivienda y su tumba debieron ser extraordinarias. Sin duda. Pero no las vemos», recuerda la investigadora. «Debería estar representado en vasijas, estelas, en el trono y en los mismos palacios.»

Lo que sí ve Manzanilla es una flor de cuatro pétalos grabada por toda la ciudad. El historiador Alfredo López Austin, de la Universidad Nacional Autónoma de México, conviene en que ese símbolo bien podría representar a las cuatro casas que gobernaron la metrópoli. Al igual que Roma, el lugar habría estado plagado de intrigas y juegos de poder. A medida que Teotihuacán se expandía y su influencia se propagaba, las élites iban adquiriendo más y más control. Las zonas comerciales se

Camino hacia el inframundo

La excavación de un túnel secreto descubierto bajo el Templo de la Serpiente Emplumada ha revelado una serie de compartimentos y cámaras con varias ofrendas ceremoniales, desde máscaras y armas hasta misteriosos espejos de pirita. El arqueólogo Sergio Gómez Chávez, del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, fue quien descubrió la entrada al túnel. Dentro de poco abrirá la última cámara, la de mayor tamaño, ubicada bajo el corazón del templo. La estancia está considerada la mejor candidata para albergar una posible tumba real, un hallazgo que podría zanjar el debate sobre el sistema político de la ciudad.



pavimentaron y la costosa piedra caliza comenzó a abundar por toda la ciudad. Las élites de las cuatro casas se volvieron ambiciosas y competitivas.

Hasta cierto punto, los datos respaldan esa imagen. Los expertos han hallado cada vez más pruebas de que gentes de todo México se mudaron a la ciudad, si bien conservaron su identidad étnica durante cientos de años. Del mismo modo que Nueva York tiene un Harlem español y un barrio chino, Teotihuacán ofrecía vecindarios para quienes procedían de Oaxaca hacia el sur, para los mayas y para los oriundos del corredor que conectaba con el golfo de México. Consideremos el barrio de Teopancazco, justo al sur del Templo de la Serpiente Emplumada. A principios de siglo, Manzanilla excavó la zona, dominada por las élites de la ruta comercial que se extendía hasta lo que hoy es Veracruz, al este de Ciudad de México, y cuyo símbolo la investigadora asocia a la serpiente emplumada. Con un territorio tan lucrativo, habrían controlado una enorme riqueza, lo que les habría permitido patrocinar el templo con su emblema.

El trabajo de Manzanilla ha revelado que las élites de la Serpiente Emplumada, desde Teotihuacán hasta el golfo de México, a doscientos kilómetros, comían doce especies distintas de pescado, salado y ahumado, y que decoraban su ropa con conchas del golfo. «Las élites competían entre ellas por lucir los mejores cosméticos, pigmentos, pieles, ropas de algodón, vestimenta y tocados», explica.

Donde más se manifestaba dicha competencia era en los enterramientos. Desde 2005, Manzanilla ha analizado con todo lujo de detalles varias tumbas, todas ellas magníficas, de adolescentes de la élite de Teopancazco. Los niños aparecen profusamente adornados con cinabrio, piedra verde y mica de los alrededores del imperio, entre otros materiales importados de sus regiones de origen.

Durante siglos, los ricos llevaron un estilo de vida cada vez más lujoso, construyeron palacios y los revistieron con piedras que habían de transportarse desde kilómetros de distancia. Pero ese tren de vida no podía durar para siempre. Hacia el año 350, algo se torció. Al parecer, veintinueve miembros de la élite fueron decapitados y sus cabezas adornadas de un modo que hasta ahora solo se ha encontrado en la antigua región de Veracruz. Manzanilla sospecha que fue un ritual de «clausura», asociado a algún tipo de transformación cultural. Hacia la misma época, el Templo de la Serpiente Emplumada fue reemplazado por otro construido justo enfrente y en el que aparecían jaguares. De hecho, pocas o ninguna serpiente emplumada volverían a aparecer en la ciudad desde entonces; en opinión de Manzanilla, una señal de que las élites de Veracruz perdieron influencia.

Sin embargo, no desparecieron. Tras aquellos acontecimientos, debió de ascender una nueva ringlera de élites cuya prosperidad, según parece, continuó en Teopancazco durante dos siglos más. Más tarde, en el año 550, Teotihuacán ardió. Nadie sabe por qué. Manzanilla explica que no hay indicios de invasión alguna. Lo que sí parece evidente es la gran brecha que separaba a ricos y pobres. El análisis de los restos humanos del yacimiento indica que buena parte de las gentes acaudaladas gozaban de buena salud. Los más necesitados, en cambio, padecían malnutrición, sufrían problemas de espalda provocados por el transporte de cargas pesadas e incluso patologías debidas a la falta de sol, tal vez como consecuencia de la sobreexplotación en los talleres. «Mi tesis es que las élites intermedias se rebelaron contra las gobernantes, que habrían intentado controlar las revueltas demasiado tarde. Esa gente tenía ya muchos intereses y alianzas en las rutas comerciales, por lo que se sublevó», apunta Manzanilla.

La investigadora cree que, después de aquello, unos contritos dirigentes dedicaron sus esfuerzos a construir viviendas en vez de templos. Un siglo después, la ciudad se desmoronaría para siempre. Para las élites, explica, esta secuencia de acontecimientos no habría significado más que empaquetar sus enseres y volver a sus lugares de origen, en los confines del imperio.

Teopancazco revela un segmento de la vida de Teotihuacán ajena a los grandes templos. Aunque también era una ciudad multicultural, no era tanto un crisol, sino más bien un mosaico. Sus culturas no estaban mezcladas, cada una mantenía su identidad y competía ferozmente con sus vecinos por el prestigio y la autoridad. Eso podría explicar por qué no existía un lenguaje escrito unificado ni imágenes de reyes, como en la civilización maya. Tales representaciones habrían supuesto inclinar demasiado la balanza hacia uno de los lados.

Con todo, el aspecto más fascinante de Teotihuacán tal vez sea que tanto la teoría de Manzanilla como la de Sugiyama podrían ser ciertas. George Cowgill, profesor emérito de la Universidad de Arizona, ha propuesto que Teotihuacán osciló entre ambos modelos, cambiando ocasionalmente cuando el gobernante adecuado se hacía con el poder. Sin embargo, ni a Manzanilla ni a Sugiyama les agrada este compromiso.

LA CÁMARA DE LOS SECRETOS

Quizá nunca sepamos a ciencia cierta quién gobernó Teotihuacán. Pero puede que Sergio Gómez Chávez, arqueólogo del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, halle pronto una pieza crucial del rompecabezas. El experto ha excavado en Teotihuacán durante décadas, tanto en viviendas corrientes, como las del barrio de Oaxaca, como en los grandes templos. Uno de sus proyectos consistió en excavar el sistema de drenaje del Templo de la Serpiente Emplumada. Intentaba restaurarlo para proteger su estructura de futuros daños ocasionados por el agua durante las tormentas. Aunque el antiguo sistema de drenaje funcionaba a la perfección, el arqueólogo descubrió que había sido obstruido a propósito con cincuenta cuerpos humanos a los que les faltaban las extremidades. ¿Quién construye un sumidero solo para taponarlo como ritual? Gómez Chávez sabía que el sumidero había sido bloqueado hacia las mismas fechas en que se construyó la cuarta versión del Templo de la Luna. ¿Y si se hizo a propósito? ¿Y si los moradores de la ciudad querían inundar la zona cada año? (Los teotihuacanos eran conocidos por su capacidad para desviar ríos, entre otros proyectos hidráulicos.) Fue durante una de esas excavaciones cuando, un portentoso jueves de octubre de 2003, el arqueólogo hizo su descubrimiento más impactante.

«Al llegar al trabajo, como cualquier otro día, me informaron de que había aparecido un gran agujero cerca del templo», recuerda Gómez Chávez. El investigador corrió hacia el lugar y comprobó que, en efecto, las lluvias de la noche anterior habían abierto un socavón perfectamente circular. No lo dudó un instante y le pidió a uno de los trabajadores que trajera una cuerda. Amarrado a ella, se las arregló para introducirse por el hueco mientras varios compañeros sujetaban desde arriba. El socavón era unos cincuenta centímetros más ancho que su espalda y se extendía unos quince metros. Se asemejaba en gran medida a un pozo, solo que, cuando Gómez Chávez llegó al fondo, vio que las piedras y los escombros de los lados estaban sueltos, como si se hubieran colocado para sellar un túnel horizontal que cruzaba en ambos sentidos. Por encima de ese relleno había un hueco por el que casi podía mirar. «No pude dormir durante una semana: no sabía qué había allí», recuerda.

Parecía que un túnel horizontal, perpendicular a la cavidad, había sido rellenado hacía largo tiempo con piedras y desechos con el objetivo de sellarlo de manera definitiva. Un lado se dirigía hacia una entrada ceremonial trasera, oculta a la vista desde hacía tiempo. El otro iba mucho más allá: directo al corazón del Templo de la Serpiente Emplumada. El hoyo que había descubierto quizá sirviese para ventilar o iluminar el túnel o para observar las estrellas. Fue necesaria una década de trabajo para limpiar el corredor. Había sido obstruido hacia el siglo III, la época clave en la expansión de la ciudad. Con ayuda de un radar y un sónar, Gómez Chávez descubrió que desde el túnel se accedía a una serie de tres cámaras situadas bajo el centro de la pirámide, por lo que continuó excavando en esa dirección. Hoy casi ha terminado.

Hace algunos meses, Gómez Chávez me invitó a visitar el túnel. El investigador cree que la extensión al pie del Templo de la Serpiente Emplumada era inundada a propósito todos los años. En el interior del túnel reina un frío atroz. El investigador señala que, cuando los teotihuacanos lo utilizaban, el nivel freático les llegaba a los pies, lo que tal vez explicase por qué lo construyeron justo a esa profundidad. Un espacio oscuro y fresco con agua en el suelo quizá fuese para ellos una alegoría del inframundo. En varios lugares pueden verse restos de la arcilla especial que usaban para forrar el túnel. Salpicada de pirita brillante, parece cuajada de estrellas centelleantes. «Esto ya no es un templo dedicado a Quetzalcoatl, sino uno para conmemorar el principio del tiempo mítico», apunta el investigador.

Tras extraer casi mil toneladas de residuos, Gómez Chávez y sus colaboradores han descubierto una serie de compartimentos sellados. Al abrirlos, han encontrado ofrendas cada vez más sofisticadas, como máscaras, armas e incluso esteras de caña, las cuales podrían haber sido empleadas a modo de tronos. «La concentración de materiales resulta impresionante. Es increíble todo lo que ha descubierto», reconoce Sugiyama. Ahora vacíos, los compartimentos parecen hoyos alineados en el suelo del túnel. Al caminar sobre tablones de madera hay que tener cuidado para no caer en uno de ellos.

En la primavera de 2013, sirviéndose de un robot autónomo, Gómez Chávez pudo ver qué había en dos de las tres grandes cámaras al final del corredor. Una contenía docenas de esferas de cuarzo; la otra, espejos de pirita. Nadie sabe lo que eran ni ha visto nunca nada parecido.

Gómez Chávez imagina el lugar como un elaborado espacio ritual donde los hombres abandonaban el mundo terrenal y emergían como reyes. Sugiyama, algo molesto por no haber descubierto él el túnel durante el curso de sus investigaciones, opina que no hay mejor candidata que esta cámara para una tumba real. Incluso Manzanilla admite que el descubrimiento de una tumba real revestiría suma importancia. Insiste en que no socavaría su teoría, aunque eso parece depender de lo que esconda su interior.

Mientras tanto, Manzanilla continúa trabajando en Xalla, su propia excavación. Se trata de un conjunto de cinco edificaciones situadas no lejos de la Pirámide del Sol y distribuidas en forma de diamante, casi como una flor de cuatro pétalos con un altar en el medio. La investigadora cree que correspondería al centro administrativo de la ciudad, donde cada una de las cuatro casas enviaba a los emisarios que se ocupaban de sus negocios.

En cualquier caso, ya sea Manzanilla quien demuestre su teoría de un gobierno repartido o Gómez Chávez quien halle a un rey todopoderoso al final del túnel, Teotihuacán nunca será la misma. Por fin, como barcos saliendo de la niebla, las vidas de sus gentes resurgen tras 1300 años de misterio para contar su historia.

PARA SABER MÁS

Teotihuacán. René Millon en *Scientific American*, junio de 1967.
Human sacrifice, militarism, and rulership: Materialization of state ideology at the feathered Serpent Pyramid, Teotihuacán. Saburo Sugiyama. Cambridge University Press, 2005.
Corporate life in apartment and barrio compounds at Teotihuacán, Central México. Linda R. Manzanilla en *Domestic life in prehispanic capitals: A study of specialization, hierarchy, and ethnicity*. Dirigido por Linda R. Manzanilla y Claude Chapdelaine. Museo de Antropología de la Universidad de Michigan, 2009.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cámaras ocultas en la Pirámide del Sol. Rubén Alfaro, Linda Manzanilla, A. Menchaca Rocha y otros en *IyC*, septiembre de 2007.

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

FRUTAS Y VERDURAS MÁS SABROSAS

Los productos del supermercado son hoy más voluminosos y firmes, pero han perdido gran parte de su sabor. Los científicos conocen ahora el modo de recuperarlo sin recurrir a la ingeniería genética

Ferris Jabr

BIRTE VON KAMPEN *(diseño de las ilustraciones)*; DAN SAELINGER *(fotografías)*



Ferris Jabr es colaborador de *Scientific American* y periodista independiente. Ha escrito para *New York Times, Wired, Popular Mechanics, New Scientist*, NOVA Next y The Awl.



LA SECCIÓN DE FRUTAS Y VERDURAS DEL SUPERMERCADO NOS ATRAE POR LAS SENSACIONES VISUALES QUE NOS DESPIERTA.

Las fresas presentan un aspecto firme y reluciente; los tomates, una piel lisa y brillante, y los melones, una carne recia y un buen color. Sin embargo, muy a menudo carecen de sabor, un defecto al que nosotros mismos hemos contribuido. Al favorecer la selección de cultivos con la mejor apariencia posible y que sobrevivan semanas de transporte y almacenamiento en un lugar fresco y oscuro, hemos reducido el sabor y el aroma de nuestros alimentos.

Consideremos el dilema que se les planteaba a los obtentores con los melones, en particular los de las variedades cantalupo. Para disfrutar de su sabor completo, se deben recoger y comer en el punto óptimo de maduración, antes de que se ablanden demasiado. En las últimas etapas de su desarrollo, emiten una gran cantidad de etileno, una hormona que los hace madurar en poco tiempo. Esta rápida senescencia complica el transporte a larga distancia, incluso si se utiliza hielo. Así que los fitomejoradores disminuyeron los niveles de etileno de los melones mediante la polinización cruzada con otros que producían de forma natural cantidades más bajas de la hormona. Los frutos resultantes no emiten suficiente etileno y se mantienen firmes en el viaje desde el campo al supermercado; sin embargo, no presentan las reacciones químicas que dan lugar al aroma y el sabor típicos del melón maduro.

Los mejoradores han conseguido en cierto modo superar esta difícil situación. En los años noventa del siglo xx, Dominique Chambeyron, de la empresa holandesa De Ruiter Seeds Group, se las arregló para crear una variedad de melón cantalupo pequeño y rayado que retiene tanto la firmeza como el sabor durante semanas después de haber sido cosechado. Conocida como Melorange, esta variedad se cultiva en América Central y se envía a Sam's Club y otras cadenas de tiendas selectas en los EE.UU. entre diciembre y abril, cuando ya hace demasiado frío para cultivar melones de forma local. Probé una tajada de uno de ellos en marzo pasado: presentaba una textura firme y un sabor y aroma intensos. Por desgracia, el tipo de mejora tradicional que se realiza para obtener la variedad Melorange depende en gran medida de la suerte. Los fitomejoradores deben cruzar plantas una y otra vez y esperar a que algunos individuos de la descendencia hereden los caracteres adecuados. Para comprobarlo, aguardan a que las plantas crezcan y produzcan frutos maduros. Gran parte del material vegetal que obtienen está lejos de lo que buscan y no les sirve.

En tiempo reciente, la genética ha ofrecido una solución alternativa. En Monsanto, que compró De Ruiter en el 2008, Jeff Mills y sus colaboradores pueden predecir la calidad de los frutos de una planta de melón cantalupo antes incluso de sembrar las semillas. Primero de todo debieron identificar los genes de melón responsables de la combinación única de aroma y firmeza que posee Melorange. Buscaron marcadores genéticos en las semillas de los cantalupos con la ayuda de un grupo de robots que trabajan de forma casi autónoma.

El pasado noviembre, cuando visité el laboratorio de mejora molecular de Monsanto en su centro de investigación y

EN SÍNTESIS

La creación de cultivos lo bastante extensos y productivos para satisfacer la demanda de la industria agrícola ha dado lugar a frutas y verduras de supermercado que a menudo carecen de sabor y nutrientes, en comparación con las variedades tradicionales.

En lugar de mejorar estas plantas mediante ingeniería genética, lo cual avivaría la polémica sobre los alimentos transgénicos, los científicos están volviéndose hacia la selección asistida por marcadores, una técnica que combina la mejora de plantas tradicional con un análisis del ADN cada vez más rápido.

En el pasado, los fitomejoradores de las universidades hubieran donado estas variedades nuevas a los agricultores. Actualmente están obligados a licenciar las semillas a un puñado de grandes compañías privadas que muchos piensan que han ganado demasiado poder.

desarrollo de plantas hortícolas en Woodland, California, pude ver muchos de estos aparatos en acción. Una máquina corta un pequeño fragmento de una semilla para analizar su ADN; el resto del grano queda inalterado, con lo que puede sembrarse en el invernadero o en el campo. Otro robot extrae el ADN del fragmento y añade los reactivos y enzimas necesarios para que unos marcadores fluorescentes se unan a los genes de interés. Por último, un aparato amplifica los marcadores fluorescentes para poder medir la luz que emiten y determinar la presencia de algún gen relevante.

Estas técnicas se conocen como selección asistida por marcadores. No son nuevas, pero se han perfeccionado de forma extraordinaria en los últimos diez años porque la secuenciación de ADN se ha vuelto mucho más rápida y barata. Las cortadoras de semillas de Monsanto pueden funcionar las 24 horas del día y todo el sistema puede proporcionar resultados a los mejoradores en un par de semanas. En el último decenio, los mejoradores de compañías privadas y de universidades han creado una gran variedad de frutas y verduras con mucho mejor aroma, color, forma y propiedades nutritivas, algunas de las cuales ya se distribuyen en tiendas y mercados. Además de melones más apetitosos, se han obtenido brécoles con una riqueza de nutrientes mayor de lo normal, fresas realmente suculentas y tomates que regalan la vista y el gusto.

«El impacto de la genómica sobre la mejora de plantas casi supera mi capacidad de comprensión», comenta Shelley Jansky, experta en mejora de la patata que trabaja para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la Universidad de Wisconsin en Madison. «Hace cinco años, tuve un doctorando que se pasó tres años tratando de identificar las secuencias de ADN asociadas con la resistencia a una enfermedad. Tras centenares de horas en el laboratorio, acabó obteniendo 18 marcadores genéticos. Ahora mis estudiantes identifican 8000 marcadores en cada una de 200 plantas en cuestión de semanas.»

Esta descripción sobre el análisis del ADN nos recuerda, de forma sospechosa, a la ingeniería genética, la técnica que produce organismos transgénicos. Sin embargo, se trata de una estrategia totalmente distinta. Esta es una de las razones principales por la que interesa a los investigadores y compañías de semillas como Monsanto.

LAS SEMILLAS DEL CAMBIO

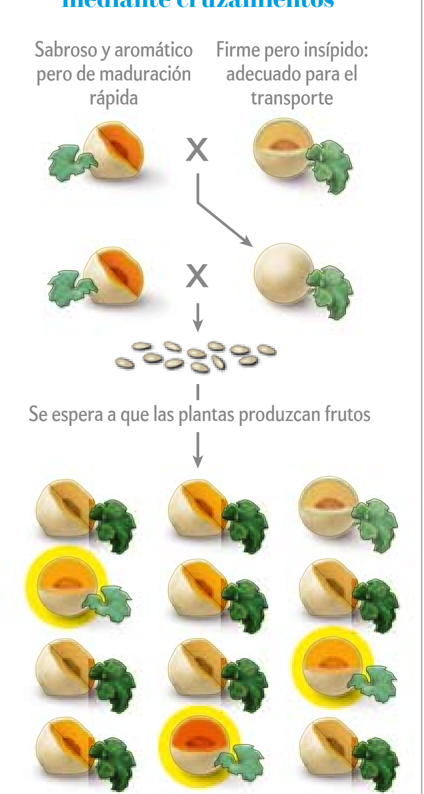
Los humanos hemos cambiado las propiedades de las plantas para satisfacer nuestros propósitos por lo menos desde hace 9000 años. Casi todas las frutas y verduras que comemos son especies domesticadas que hemos transformado a través de décadas de selección y reproducción artificial. Guardábamos las semillas de las plantas que tuvieran las características más deseables y realizábamos cruzamientos con otras para crear nuevas combinaciones de caracteres. De esta manera, nuestros antepasados convirtieron una hierba escuálida llamada teosinte en la planta de maíz, con un tallo robusto y unas grandes mazorcas; y transformaron una sola especie de col silvestre en brécol, coles de Bruselas, coliflor y col rizada.

En la década de los ochenta, los científicos idearon un método mucho más complejo para cambiar el ADN de una planta. Se desarrolló la ingeniería genética, que consiste en la inserción, supresión o algún otro tipo de modificación directa de los genes de una planta mediante herramientas desarrolladas en el laboratorio. En EE.UU., los productos transgénicos salieron al mercado en la década de los noventa. Aunque más del 70 por ciento de los alimentos procesados en el país contienen ingredientes procedentes de maíz, soja o colza transgénicos, muy pocas de las verduras y frutas frescas que se venden en los supermercados

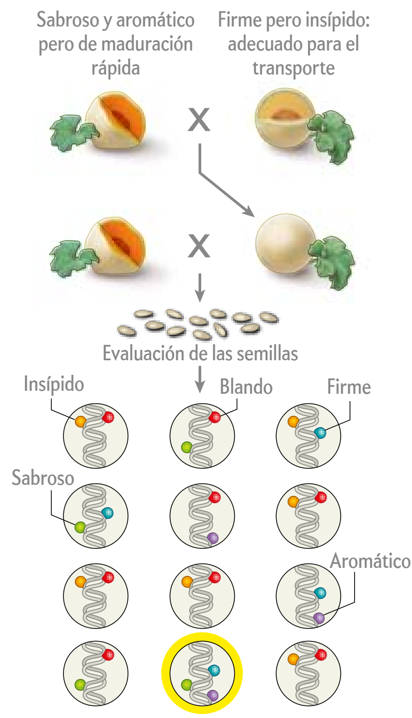
LAS BASES

Selección asistida por marcadores

Para mejorar una planta cultivada, los obtentores deben realizar numerosos cruzamientos durante años y descartar con paciencia los caracteres no deseados de los frutos sin perder los ventajosos. Cuando ha sido posible identificar los genes responsables de estos caracteres se ha abierto la posibilidad de un proceso mucho más eficiente y preciso: la selección asistida por marcadores.



Los mejoradores normalmente deben aguardar una temporada a que los cultivos experimentales maduren; entonces miden la calidad del producto y seleccionan los más favorables (*amarillo*) para continuar la mejora.



Una vez determinados los marcadores genéticos de los diferentes caracteres, como el sabor o la firmeza, se analiza el ADN extraído de las semillas o las hojas de las plantas jóvenes y se identifican los candidatos ideales (*amarillo*) para los experimentos de mejora mucho antes del momento de la cosecha.

JEN CHRISTIANSEN

han sido modificadas genéticamente. Entre las excepciones cabe destacar la papaya, la ciruela y la calabaza resistentes a virus, así como el maíz dulce resistente a las plagas.

Una de las razones de la escasez de frutas frescas y verduras transgénicas es que, en general, corresponden a cultivos de menor importancia económica y extensión que los principales del país: maíz, soja, trigo, algodón, sorgo y arroz. Cuando se trata de frutas y verduras, las empresas de semillas se resisten a financiar las pesadas y costosas pruebas y procedimientos que los sistemas legislativos del país exigen para la autorización de un organismo transgénico destinado al consumo. El otro gran obstáculo es la oposición pública. Las universidades y las empresas de semillas saben que la comercialización de nuevos productos de ese tipo podría enfurecer a ciertos segmentos de la población, que se oponen a lo que consideran alimentos «aberrantes». En cualquier caso, los compradores siguen ignorando que en las tiendas estadounidenses ya existen unas pocas frutas y vegetales transgénicos, ya que generalmente no se etiquetan como tales.



En la última década, la selección asistida por marcadores se ha convertido en una forma cada vez más útil para mejorar las frutas y verduras. Al mismo tiempo, permite salvar los obstáculos mencionados, sobre todo porque las técnicas genéticas han mejorado y los científicos han obtenido la secuencia del genoma de cada vez más plantas agrícolas. En particular, la combinación del análisis del ADN y la mejora tradicional está ayudando a los mejoradores a dirigir su atención hacia la calidad de los alimentos que más importan a los consumidores. «Aunque lo obvio sería intentar satisfacer los deseos del consumidor, no siempre se hace así», comenta Harry Klee, mejorador del tomate de la Universidad de Florida. Por el contrario, casi siempre se priorizan las necesidades de los agricultores y los distribuidores de alimentos.

El tomate clásico de supermercado ofrece un ejemplo claro. Durante décadas, los expertos han considerado que el equilibrio de ácidos y azúcares es el factor principal que determina si nos van a agradar. A la gente suelen gustarle los tomates más dulces. Pero la mayoría de los mejoradores no se han preocupado especialmente por el sabor. Al pensar en los productores comerciales a gran escala, se han concentrado en obtener plantas que rindan una gran cantidad de tomates con una superficie lisa y resistente y que permanezcan frescos para cuando lleguen a la tienda. Sin embargo, cuantos más tomates produce una planta, menos azúcares puede destinar a cada uno de ellos. Los que vemos en el supermercado pueden parecernos apetitosos, pero no tienen suficiente azúcar para satisfacer lo que esperan nuestras papilas gustativas.

Klee está decidido a recuperar para la industria el sabor del tomate. A través de una serie de grandes pruebas, ha evaluado el gusto de unas doscientas variedades tradicionales. Se trata de cultivares conservados por pequeños grupos de agricultores y jardineros y vendidos en algunas tiendas y mercados locales. Estos frutos pueden resultar de interés por sus colores intensos y sabor delicioso, pero su piel tiende a agrietarse, se marchitan pronto y proceden de plantas que no forman suficientes frutos para cumplir con la demanda de los grandes productores agrícolas.

En su investigación, Klee ha aprendido que muchas variedades tradicionales son más sabrosas que los tomates actuales no porque contengan más azúcar, sino porque son muy ricos en un componente del sabor mucho más complejo: las sustancias aromáticas emitidas por las plantas, que corresponden a compuestos orgánicos volátiles. En un estudio de 2012, descubrió que a las personas les gustan los tomates con niveles moderados de azúcar si también contienen suficiente geranial. Klee sospecha que esta y otras sustancias volátiles no solo dan al fruto el aroma, sino que también aumentan su dulzura. En estudios posteriores, creó tomates que carecían de geranial y otras moléculas olorosas y no gustaron a los voluntarios que los probaron. Aunque presentaran unos niveles altos de azúcar, al no poseer sustancias volátiles, no los percibieron como dulces.

Últimamente Klee ha intentado obtener plantas híbridas que den a productores y consumidores las mejores propiedades del tomate, las antiguas y las nuevas. En los últimos tres años, él y sus colaboradores han cruzado las variedades tradicionales más deliciosas que han hallado con los tomates actuales para crear plantas híbridas que ofrezcan un buen rendimiento,

sean firmes y cuenten con una piel suave y un gran sabor. Klee está haciendo acopio de cepillos de dientes eléctricos baratos, que él y su equipo utilizan para agitar suavemente las flores de tomateras; recogen así el polen en tubos de ensayo y con él realizan cruzamientos con otras plantas. Al mismo tiempo, emplean taladros para extraer fragmentos de hojas y analizar el ADN de las plantas, en busca de patrones genéticos que correspondan a frutos con altos niveles de compuestos volátiles o a una piel sin defectos. «El análisis genético es la base para tomar las decisiones de cruce», apunta Klee. «Nuestro trabajo se ha acelerado en los últimos dos años, con la descripción de la secuencia del genoma del tomate.»

Hace poco, la Universidad de Florida ha publicado dos de estos híbridos (Garden Gem y Garden Treasury) que desearía licenciar a una empresa de semillas para su distribución a gran escala. Aunque los híbridos no rinden tanto como los tomates comerciales, producen tres veces más frutos que sus parientes tradicionales, poseen un sabor exquisito y soportan bien el transporte. Vance Whitaker, colaborador de Klee, está avanzando a buen ritmo en un proyecto para mejorar el sabor de las fresas de supermercado, que también han ganado en tamaño y durabilidad a expensas del gusto.

Otra víctima de las dificultades de distribución, junto con melones y tomates, es el brécol. Alrededor del 75 por ciento del que se cosecha en EE.UU. se cultiva en California. La hortaliza adora el clima frío y florece en los bancos de niebla que invaden en ocasiones el Valle de Salinas. Cuando debe soportar los tórridos veranos del noreste del país, el vegetal produce cabezas retorcidas con yemas de tamaños irregulares. Cada una de las pequeñas yemas que forman la cabeza del brécol corresponde al rudimento de una flor que todavía no se ha formado. Thomas Björkman, de la Universidad Cornell, y sus colaboradores han descubierto que, durante un período crítico de su desarrollo, el brécol «calcula» las horas de temperatura fresca de las que goza y desarrolla una cabeza floral uniforme solo si ese número es lo bastante elevado. De ahí que el brécol cultivado en la costa este acabe formando una mezcla poco atractiva de yemas florales bonitas y llenas, y otras escuálidas y casi imperceptibles.

Hace tres años y medio, Björkman, Mark Farnham, del USDA, y sus colaboradores decidieron crear un nuevo tipo de brécol que pudiera cultivarse en la parte oriental del país. En la cámara de crecimiento de su laboratorio, han venido sometiendo a la planta a la temperatura y humedad propias de la costa este, y han conservado las semillas solo de los ejemplares que desarrollaban las cabezas más atractivas en estas condiciones. A pesar del trabajo que todavía les queda, ya han obtenido plantas que resisten unas semanas más de calor que las variedades que hoy se cultivan en el este. Mientras tanto, se están analizando los genomas de los distintos brécoles, en busca de genes que expliquen por qué algunos funcionan mejor que otros. De hallarlos, podrían ahorrarse años en el camino hacia la planta ideal que desean.

Obtener un brécol que mantenga un buen aspecto con altas temperaturas no es solo un ejercicio de estética. También se pretende proporcionar una hortaliza más sabrosa y nutritiva a los mercados de agricultores y tiendas de comestibles. Björkman comenta que el brécol fresco consumido el mismo día que se ha recogido es diferente del producto típico de supermercado. Es tierno, posee un suave sabor a verdura, algo aromático, y carece de regusto ácido. Transportarlo de California a otras partes del país requiere almacenarlo sobre hielo en la oscuridad durante días. Sin luz, la fotosíntesis se detiene y las células dejan de producir azúcares. Con el descenso rápido de la temperatura, las paredes celulares se rompen, con lo que se debilita de forma irrevocable la estructura de la planta y disminuye la firmeza del producto. Cuando se descongela el brécol, diversas enzimas y moléculas salen de las células y desencadenan una secuencia de reacciones químicas, algunas de las cuales provocan la degradación de compuestos que confieren sus propiedades nutricionales y sabor. Proporcionar a los agricultores del este los brécoles que puedan cultivar y vender localmente resolvería todos estos problemas.

En un esfuerzo distinto dirigido a aumentar el valor nutricional de esta hortaliza, Richard Mithen, del Instituto de Investigación de los Alimentos en Inglaterra, y sus colaboradores emplearon la selección asistida por marcadores para aumentar los niveles de glucorafanina, un compuesto que, según algunos, puede ayudar a combatir las bacterias y el cáncer. Desde entonces, han licenciado a Monsanto la variedad de brécol resultante, llamada Beneforté. Ya pueden encontrarse estas verduras en algunos supermercados estadounidenses, como Whole Foods Market y Stater Bros.

SEMBRANDO INNOVACIÓN

Con el fin de recibir financiación para su proyecto, Björkman y Farnham tuvieron que demostrar al USDA, mediante la obtención de fondos del sector privado, que las compañías de semillas estaban genuinamente interesadas en un nuevo mercado regional del brécol. Monsanto, Syngenta y Bejo Seeds contribuyeron al proyecto a pesar de ser competidores. En teoría, tanto las compañías de semillas como los investigadores universitarios pueden beneficiarse de este tipo de colaboración. Durante la fase de investigación y desarrollo, todos ellos comparten información e intercambian semillas. No obstante, al final llega el momento de las negociaciones. Igual que Klee y sus sabrosos tomates, Björkman espera que cuando esté a punto de conseguir su brécol ideal, una empresa privada licenciará esas semillas y las producirá a gran escala para los cultivadores comerciales. Él y su equipo carecen del capital para tal fin. Buscar marcadores genéticos en plantas individuales es un trabajo que puede realizarse de forma cada vez más barata, pero generar grandes cantidades de semillas y hacerlas llegar a los agricultores sigue resultando costoso.

Algunos fitomejoradores están preocupados porque, dado que las compañías gigantes de semillas cuentan con muchos más recursos financieros y técnicos que las pequeñas empresas y universidades, la verdadera innovación irá desapareciendo. «Los programas de mejora en el sector público han disminuido de forma notable, ya que el conocimiento se ha transferido al sector privado», comenta Irwin Goldman, de la Universidad de Wisconsin-Madison, que hace poco introdujo una remolacha de mesa de color naranja con franjas de oro concéntricas. «Algunas personas opinan que tal transferencia representa un éxito para el país. No obstante, la mejora genética pública puede centrarse en aspectos que el sector privado no contemplará nunca porque exigen demasiado tiempo o conllevan un riesgo excesivo.»

Jack Juvik, que dirige el centro de fitomejoramiento en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y que empezó a trabajar en la mejora vegetal en los años setenta, recuerda que por entonces las grandes compañías no ocupaban una posición tan dominante como hoy. Había numerosas empresas pequeñas que vendían una gran cantidad de semillas, pero hoy casi todas han sido compradas o expulsadas del mercado por las megaempresas, lo cual ha cambiado toda la estructura de la industria. «En lugar de que las instituciones públicas cuenten

con personal que desarrolle las variedades hasta el final, la mayoría de nosotros diseñamos germoplasma (semillas y cultivares) para que las grandes empresas trabajen con él. Estas poseen los recursos para llevar a cabo las pruebas necesarias y crear algunas variedades realmente buenas, pero terminan controlando la mayor parte del germoplasma y la tecnología utilizados en su elaboración.»

Goldman y su colaborador de la universidad Jack Kloppenburg pertenecen a un grupo de veinte mejoradores y agricultores de todo el país que están interesados en desarrollar un equivalente al *software* de código abierto para las semillas, con variedades no patentadas que cualquiera pueda aprovechar. Sin embargo, no hay precedentes sobre un mecanismo así en el panorama comercial de las semillas del siglo XXI. Una opción, aunque tal vez cara, consistiría en que los fitomejoradores contratasen a abogados y obtuvieran patentes o derechos sobre sus semillas con la intención de dejar que las utilice casi todo el mundo (excepto las grandes compañías, por supuesto). O bien, podrían tratar de crear un tipo de licencia de código abierto que permitiera usar las semillas solo a aquellos que también aceptaran compartir con ellos todo lo que hacen. Goldman ha propuesto también un compromiso en el que los mejoradores licencien algunas semillas al sector privado para obtener un beneficio, pero hagan disponibles otras.

Klee se pregunta si un cierto compromiso representa el mejor camino. «La realidad es que el mundo académico no puede competir con Monsanto u otras empresas grandes de semillas», apunta. «Los mejoradores de las universidades se ven empujados a abandonar los grandes cultivos y a concentrarse en los especializados. En mi departamento hay un mejorador de melocotón, uno de arándanos y otro de fresa. Conozco a muchos en Monsanto que han descartado este tipo de cultivos poco rentables para ellos.» Tal dicotomía, espera, puede resultar complementaria, de forma que los sectores público y privado deleguen uno al otro actividades distintas.

En última instancia, lo que más le importa a Klee es el reto al que cada vez más se enfrentan los fitomejoradores: reducir la brecha entre lo que los productores necesitan para ganarse la vida y lo que los consumidores quieren en sus platos. «La reproducción asistida por marcadores permite ir hacia atrás y recuperar rasgos como el sabor y la textura», observa. «Al final, la solución es muy simple: démosle a la gente lo que le gusta.»

PARA SABER MÁS

Breeding better crops. Richard Hamilton en *Scientific American Earth 3.0*, junio de 2009.

Improving the flavor of fresh fruits: Genomics, biochemistry, and biotechnology. Harry J. Klee en *New Phytologist*, vol. 187, n.º1, págs. 44-56, julio de 2010. **onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2010.03281.x/full**

EN NUESTRO ARCHIVO

Mejora genética de cereales. Stephen A. Goff y John M. Salmeron en *IyC*, octubre de 2004.

Mejora del arroz. Y. Coudert, C. Périn, B. Courtois y P. Gantet en *IyC*, octubre de 2010.

Cultivos transgénicos: sigue el debate. David H. Freedman en *IyC*, noviembre de 2013.

por Zulema Varela Río

Líquenes: vigías ambientales

La presencia o ausencia de estos organismos nos informan de la calidad del aire que respiramos

Para poder evaluar los posibles efectos nocivos de la contaminación sobre el medio, no existe mejor herramienta que el estudio de los organismos que viven en él. Es lo que nos proponemos en nuestro grupo de investigación, donde llevamos años trabajando en la biomonitorización de la calidad del aire que respiramos mediante el empleo de musgos y líquenes, unos organismos que nos proporcionan una valiosa información.

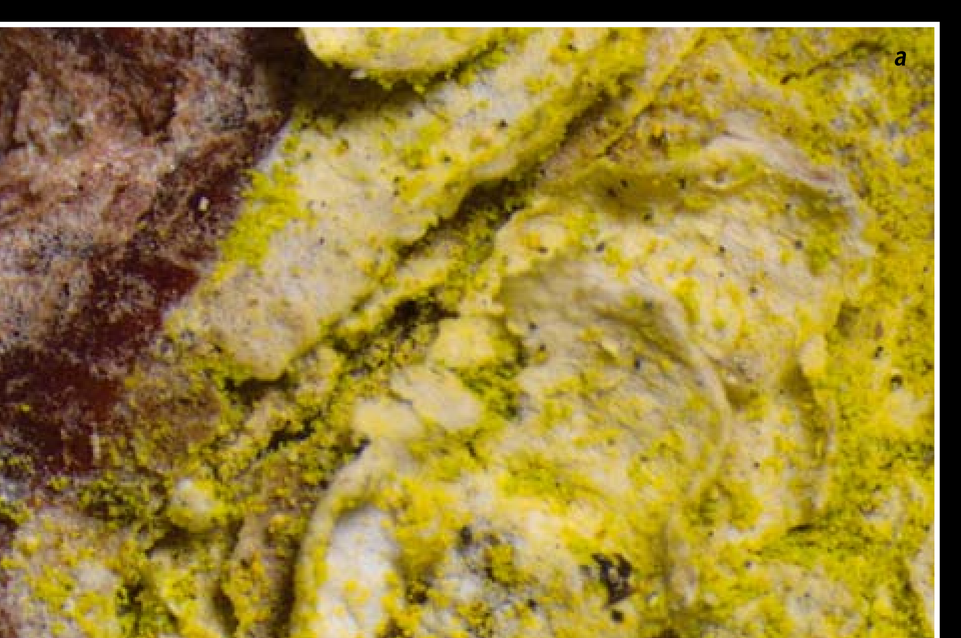
Los líquenes son seres enigmáticos formados por la simbiosis entre un organismo micobionte (un hongo heterótrofo) y otro fotobionte (algas o cianobacterias autótrofas). Esta asociación origina una estructura morfológica particular, el talo, que presenta unos rasgos biológicos singulares, como la ausencia de cutícula (la capa protectora de los tejidos vegetales) y de raíces, el mantenimiento de un metabolismo activo en ambientes extremos o un crecimiento lento.

A diferencia de las plantas superiores, los líquenes carecen de estomas para realizar el intercambio gaseoso con el aire. En su lugar, presentan unos poros cuya apertura o cierre no pueden regular. Ello facilita la entrada de varios contaminantes atmosféricos, sobre todo dióxido de azufre (SO_2). Una vez en el interior del vegetal, este gas destruye la clorofila y altera la fotosíntesis. Los daños pueden variar desde una reducción en la velocidad de crecimiento hasta la propia muerte. Además, el SO_2 en contacto con el agua del medio da lugar a ácido sufuroso, que provoca una fuerte acidificación del sustrato sobre el que viven los líquenes y altera su morfología, estructura y fisiología.

Los líquenes pueden agruparse en tres biotipos fundamentales según su forma. Los crustáceos tienen aspecto de costra y se adhieren fuertemente a su soporte por la cara inferior; los foliáceos poseen un talo con apariencia de hojas o láminas y un borde que se separa bien del sustrato; y los fruticulosos se caracterizan por su forma de arbusto y por fijarse al sustrato en un único punto. En general, los fruticulosos son más sensibles a la contaminación. Debido a su mayor índice superficie/masa, se hallan más expuestos a los contaminantes, por lo que solo viven donde el aire está limpio. En cambio, los de tipo crustáceo están menos expuestos y son más tolerantes.

—Zulema Varela Río
Grupo de ecotoxicología
Facultad de biología
Universidad de Santiago de Compostela







EL LIQUEN foliáceo *Xanthoria polycarpa* presenta una tolerancia intermedia a la contaminación ambiental. Las estructuras redondeadas en forma de disco o copa corresponden a cuerpos fructíferos, los apotecios.





LOS LÍQUENES presentan diversas morfologías con una relación superficie/masa distinta. Este valor es bajo en el liquen crustáceo *Chrysothrix candelaris,* muy adherido al sustrato (*a*). Al estar menos expuesto al aire, resiste bien la contaminación. En el otro extremo se halla *Pseudovernia furfuracea*, de talo fruticuloso y muy sensible a los contaminantes (*b*). *Candelaria concolor*, con talo foliáceo, muestra una vulnerabilidad intermedia (*c*).

por María Cerezo



María Cerezo es profesora de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de Murcia.

¿Máquinas pensantes?

En fecha reciente un ordenador ha pasado con éxito el test de Turing. ¿Significa que se trata de un artefacto inteligente?

En junio de este año se difundió la noticia de que un programa de ordenador, Eugene Goostman, había superado el test de Turing, es decir, el «juego de imitación» que el matemático Alan Turing propuso en 1950 como criterio para la atribución de inteligencia a las máquinas. En este, un ser humano conversa con otro ser humano y con un programa de ordenador, sin saber cuál es cuál, y debe adivinar cuál de sus dos interlocutores es el humano y cuál el artefacto. Según Turing, el día en que el ordenador consiguiera engañar al interrogador, haciéndose pasar por un ser humano, podría decirse que habría superado el juego de imitación, y podría por ello atribuirse inteligencia a esa máquina.

En su artículo de 1950 «Computing machinery and intelligence» (traducido al castellano bajo el título «¿Puede pensar una máquina?»), Turing, además de formular el juego de imitación, predijo que cincuenta años más tarde habría máquinas tan bien programadas que un interrogador normal no tendría más del 70 por ciento de posibilidades de acertar en su respuesta tras una conversación de cinco minutos, y eso, para Turing, era suficiente para responder afirmativamente a la pregunta acerca de si puede pensar una máquina.

Pero esa cuestión puede ser interpretada de diversas maneras. En una primera instancia, responder que sí se reduce a afirmar que un ordenador ha sido capaz de engañar a los interrogadores humanos de la manera propuesta por Turing. En principio, dado el éxito de Eugene Goostman y otros *bots* conversacionales semejantes, parece que en este primer sentido la respuesta afirmativa podría estar justificada. Esto, a su vez, conlleva una respuesta afirmativa también a la cuestión acerca de si los procedimientos algorítmicos efectivos (que permiten resolver problemas de manera automática en un número finito de pasos) son capaces de generar un comportamiento como el ideado por el juego de imitación.

Sin embargo, la pregunta crucial en filosofía de la inteligencia artificial es más profunda, y guarda relación con el concepto de inteligencia que se presupone al presentar el juego de imitación como criterio para atribuir esta capacidad a las máquinas. Con su test, Turing proponía reemplazar la pregunta de si piensan las máquinas por la de si pueden pasar con éxito el juego de imitación. Las dos últimas décadas del siglo xx contemplaron fuertes discusiones en las que se debatía precisamente esta cuestión, si la inteligencia puede reducirse a comportamiento inteligente, es decir, si el hecho de que algo se comporte *como si* fuera inteligente es suficiente para decir que *es* inteligente.

Entre los argumentos que cuestionan que el test de Turing ofrezca un criterio suficiente para saber si piensan las máquinas, destaca el de la habitación china, propuesto por John Searle, de la Universidad de Berkeley, en su artículo «Minds, brains and programs» (1980). El argumento consiste en el siguiente experimento mental. Supongamos que John es un hablante competente del inglés que no sabe absolutamente nada de chino y que está encerrado en una habitación. John recibe una primera pila de papeles escritos en chino y una segunda pila de papeles, también en chino, junto con un conjunto de instrucciones en inglés que le indican cómo debe asociar los papeles de la segunda pila con los de la primera. Supongamos finalmente que John recibe otra tercera pila con papeles en chino e instrucciones también en inglés para desarrollar la siguiente tarea: buscar, para cada papel de la tercera pila, el que es idéntico en la primera pila y el papel de la segunda pila con él asociado, y devolver este último a quien le ha entregado la tercera pila. Sin saberlo John, los que

© THINKSTOCK/ARTSHOCK

le entregan los papeles y reciben los que él devuelve entienden chino; están pasando a John preguntas en chino cuyas respuestas figuran en los papeles que este devuelve, generando, por tanto, un comportamiento que puede sugerir al observador externo que John entiende chino. Sin embargo, ya hemos dicho que John no sabe nada de esta lengua asiática. Luego el tipo de manipulación de símbolos propio de los procedimientos automáticos no parece ser suficiente para adscribir entendimiento al ejecutor de los mismos. Searle concluyó, a partir de este experimento mental, que el conocimiento sintáctico no es ni constitutivo ni suficiente para que se dé la comprensión semántica que se da en los seres humanos.

Searle admite que un programa de inteligencia artificial puede ser una buena simulación de una capacidad humana; en este caso, de la capacidad lingüística. Pero sostiene que su argumento refuta dos ideas: por un lado, que el comportamiento de una máquina conversacional permita decir que la máquina entiende las preguntas del interlocutor humano y las oraciones que ella misma emite; por otro, que lo que la máquina hace cuando ejecuta el programa constituya una explicación de la capacidad humana de entender un lenguaje y usarlo comprendiendo su significado.

En el fondo, la cuestión acerca de cómo sabemos si puede atribuirse pensamiento a las máquinas es distinta de la cuestión acerca de qué es exactamente lo que se le atribuye cuando se dice de la máquina que piensa. Y el problema del test de Turing es precisamente que reduce la segunda cuestión a la primera.

El argumento de la habitación china de Searle recibió respuestas múltiples por parte de los defensores de la inteligencia artificial fuerte, es decir, de la tesis de que las máquinas piensan y son inteligentes, y no solo simulan esa inteligencia. Una primera réplica señala que aunque John no entienda chino, eso no implica que la actividad de todo el sistema (John, las instrucciones en inglés, las pilas de textos en chino asociados unos con otros) no pueda generar «algo» que sí entienda chino. Ciertamente, el hombre que manipula las pilas no entiende chino, pero todo el sistema, que incluye a John como una parte, sí que lo entiende. Searle se defendió señalando que incluso si el hombre en la habitación memorizara las instrucciones (el programa) y todos los textos y asociaciones entre ellos (la base de datos), y los aplicara con rapidez y de una manera natural, tampoco por ello John, que sería ahora el sistema, entendería chino.

Otra crítica parecida contra el argumento de la habitación china se conoce como la «hipótesis de la mente virtual». Según esta, ni John como parte del sistema, ni John entendido como todo el sistema, entienden chino, pero la actividad del sistema es capaz de generar otra entidad, un agente o mente virtual, distinta de John y del sistema mismo, que sí entendería chino. El ejemplo típico de mentes virtuales serían los personajes de videojuegos o los asistentes virtuales de servicios en línea, que son distintos de los sistemas que los implementan. Sin embargo, no parece que el sentido en que entienden el lenguaje tales mentes virtuales sea el mismo que el sentido en que lo entiende un ser humano: en estos, el entendimiento es consciente, mientras que en las mentes virtuales no lo es.

La filosofía se cuestiona si puede darse realmente inteligencia sin consciencia

Entre otras réplicas destacan también la «respuesta del robot» y la «respuesta de las otras mentes». Según la primera, aunque el argumento de Searle sería conclusivo para establecer que un programa como el descrito en el experimento mental de la habitación china no es suficiente para generar ningún tipo de entendimiento, un programa ubicado en el interior de un robot capaz de interaccionar con el entorno a través de sensores y componentes motores, y que participara en las relaciones causales adecuadas con el entorno y pudiera, por tanto, dotar de significado a sus símbolos internos, sí podría entender un lenguaje. Según la «respuesta de las otras mentes», el comportamiento de la máquina debería ser suficiente para atribuir inteligencia a las máquinas, ya que lo es para atribuir inteligencia a otros seres humanos, y lo sería también para atribuir inteligencia a seres extraterrestres que hablaran nuestra lengua con competencia, en el caso de encontrarnos con ellos.

Son precisamente esas dos respuestas las que suscitan las cuestiones filosóficas más interesantes: por un lado, ¿conocen los agentes robóticos realmente el entorno? ¿Puede reducirse el conocimiento a procesamiento de información? ¿Cuál es la relación entre el entendimiento y la consciencia, es decir, el estado o acto por el cual advertimos nuestros propios estados o actos mentales y su contenido? Por otro, ¿cómo conocemos otras mentes? y, en particular, ¿qué criterios tenemos para saber si son conscientes? La cuestión crucial es si la atribución de inteligencia a otras mentes se reduce a aplicarles determinadas disposiciones o capacidades de comportamientos inteligentes, o si es necesario atribuirles también ciertos estados de consciencia.

Volviendo a nuestro problema inicial del test de Turing, el desarrollo de programas informáticos que exhiben comportamientos como el de Eugene Goostman parece haber hecho de las palabras como «pensar», «conocer» o «entender», términos polisémicos, es decir, que tienen varios significados, pero con una raíz común. Esos significados se relacionan entre sí, pero varían, entre otras cosas, según los objetos a los que se aplican. Podemos decir que Eugene Goostman piensa, y que es inteligente, pero, al fin y al cabo, estamos usando estos términos en un sentido análogo pero distinto al que tienen cuando atribuimos esas capacidades a un ser humano.

PARA SABER MÁS

Mentes y máquinas. Alan Turing, Hilary Putnam y Donald Davidson. Tecnos, 1985.
Mentes, cerebros y ciencia. John Searle. Cátedra, 1994.
Philosophy and theory of artificial intelligence. Dirigido por Vincent Müller. Springer Verlag, 2013.
The Chinese room argument. David Cole en *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2014 Edition). Dirigido por Edward N. Zalta. **plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/chinese-room**

EN NUESTRO ARCHIVO

Tertulia donde se discurre sobre el test de Turing y la posibilidad de crear máquinas pensantes. D. R. Hofstadter en *IyC*, julio de 1981.
Un debate sobre inteligencia artificial. John R. Searle, Paul M. Churchland y P. Smith Churchland en *La ciencia después de Alan Turing*, colección *Temas* de *IyC* n.º 68, 2012.

por Mary H. Schweitzer

Mary H. Schweitzer es profesora en el departamento de ciencias marinas, de la atmósfera y de la Tierra y en el de ciencias biológicas de la Universidad del Estado de Carolina del Norte. Además, es conservadora de paleontología de vertebrados en el Museo de Ciencias Naturales de Carolina del Norte.



La importancia de los dinosaurios

Los grandes reptiles del pasado pueden ayudarnos a comprender el presente y el futuro de nuestra era

Después de más de veinte años dedicándome profesionalmente a la paleontología, sé la suerte que tengo de pasar mi vida investigando los dinosaurios. En un momento en que muchas personas apenas pueden cubrir sus necesidades básicas, ¿cómo puedo justificar que el dinero de los contribuyentes se invierta en estudiar animales que desaparecieron hace millones de años? ¿Qué pueden enseñarnos sobre el mundo de hoy? ¿No son irrelevantes para los problemas actuales?

La verdad es que la paleontología es todo menos irrelevante. El registro fósil indica que el cambio climático es el estado «normal» del planeta. ¿Quiere decir esto que el cambio que estamos viviendo es normal, o acaso se debe a la influencia humana? ¿Cómo remediamos el daño que podemos haber causado?

La mejor manera de mirar adelante es mirar atrás, hacia organismos que, como los dinosaurios, sobrevivieron durante mucho tiempo a diferentes cambios climáticos. El registro fósil nos permite comparar los cambios climáticos actuales y sus factores antropogénicos con los que hubo en un pasado remoto, antes de que existieran los seres humanos. Y hemos encontrado pruebas de cinco eventos de extinción global previos a la aparición de los humanos, lo que permite preguntarnos si la actividad humana está causando ahora una sexta extinción. No podríamos plantear esta cuestión si no tuviéramos información sobre el pasado.

Más del 99 por ciento de las especies se han extinguido. Cada taxón que recuperamos representa un conjunto diferente de experimentos evolutivos con distintas soluciones y la mayoría de ellas solo pueden estudiarse a través del registro fósil. Entre los vertebrados, la abundancia de especies de dinosaurios nos ofrece una oportunidad de estudio única. Solo las aves (descendientes de los dinosaurios), cuentan con unas 10.000 especies y superan con creces a las 5500 o más especies de mamíferos que viven en la actualidad.

Los dinosaurios tienen mucho que enseñarnos: vivieron a lo largo de más de 200 millones de años, abarcaron todos los continentes y ocuparon prácticamente todos los nichos. Ningunos otros vertebrados terrestres han alcanzado, ni de lejos, el gran tamaño de los saurópodos, ni han logrado la eficacia en el procesamiento de alimentos de los hadrosaurios, los cuales disponían de series de dientes alineados verticalmente que se iban sustituyendo conforme se desgastaban. Y solo podemos especular sobre la diversidad de la capacidad de vuelo entre los dinosaurios aviares extintos tales como los enantiornithines y los enigmáticos microrraptores, que disponían de cuatro alas al poseer plumas de vuelo también en sus extremidades posteriores. El registro fósil nos enseña las posibilidades de adaptación de los vertebrados, tanto en la ocupación de nichos ecológicos como en las adaptaciones morfológicas y biomecánicas a esos nichos.

Hay todavía otra razón no menos importante para estudiar los dinosaurios: fascinan incluso a los no científicos. Esta atracción puede utilizarse para animar a los jóvenes a dedicarse a la ciencia, en un momento en que es más importante que nunca.

Y la estimulación de futuros investigadores no es la única manera en que la paleontología podría dinamizar otras ciencias. Estamos empezando a descifrar la información molecular escondida en el registro fósil. Ello entraña cierta complejidad, puesto que las moléculas procedentes de fósiles han cambiado irremediablemente desde que estaban en organismos vivos. Las técnicas para interpretar el código podrían resultar útiles en medicina.

En la actualidad todavía estamos perdiendo datos irreemplazables. Cuando los fósiles no se recuperan de forma adecuada, disminuye su valor científico. Ello plantea un dilema: a los agricultores de la China rural o a los nómadas de Mongolia —incluso a los ganaderos de las Grandes Llanuras de los EE.UU.—, el descubrimiento de fósiles puede ayudarles a pagar la educación de sus hijos, comprar comida o calentar su hogar en invierno. Pero los que hallan fósiles rara vez conocen o siguen métodos adecuados de excavación.



DINOSAURIO CON PLUMAS hallado en la provincia china de Liaoning.

No es culpa suya. Seguramente, la codicia de los intermediarios y los compradores adinerados son parte del problema. Y también la ignorancia. Los científicos deberían tener un papel más activo en la educación de la población y explicar por qué la recuperación adecuada de material fósil es tan importante. También necesitamos leyes más severas para disuadir del tráfico ilegal.

Los científicos tienen la responsabilidad de dar a conocer el valor de los fósiles, no solo como objetos de colección, sino por las numerosas lecciones que podemos aprender de los organismos que una vez medraron en este planeta. Solo mediante la comprensión del registro geológico de la diversidad, de las adaptaciones y de la variabilidad del clima podremos hacer frente a los retos del futuro.

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

Medusas en el plato

Una nueva propuesta para la futura alimentación en Europa

Las medusas pertenecen al conjunto de organismos que los biólogos marinos denominan zooplancton gelatinoso. Constan de un cuerpo transparente y de consistencia blanda, perfectamente descrita en su nombre en inglés: *jellyfish* («pez de gelatina»).

En el último decenio, estos animales han ganado protagonismo debido a su proliferación [*véase* «¿Por qué proliferan las medusas?», por Luis Cardona; Investigación y Ciencia, junio de 2014]. La aparición, en la portada de la revista *Time* del 4 de noviembre de 2009, del artículo «Invasion: Jellyfish swarm the Mediterranean», donde se incidía en la cuestión, extendió la problemática a los medios de comunicación de todo el mundo. A partir de entonces, se desarrollaron páginas web y aplicaciones de móvil para tener información sobre la presencia de medusas en el Mediterráneo. La aplicación Meteo Meduse, creada en 2011 y a través de la cual se accedía a conocer la presencia de medusas en las costas italianas, se descargó más de 26.000 veces.

En octubre de 2010 se celebró en Estambul un seminario sobre proliferaciones algales y de medusas en el Mediterráneo y el mar Negro, organizado por la Comisión General de Pesca del Mediterráneo. Allí se encendieron todas las alarmas y se encargó la elaboración de un informe. El documento, *Review of jellyfish blooms in the Mediterranean and Black Sea*, fue realizado por el profesor de zoología y biología marina de la Universidad del Salento Ferdinando Boero y bajo el amparo de la FAO; salió a la luz en 2013. En él, además de describir las especies de medusas y sus hábitats, se analizan los riesgos de su proliferación. En la pesca, entorpecen las labores y reducen la presencia de otras especies de consumo. En el ámbito sanitario, las picaduras afectan a miles de personas cada año. En el turismo, el alarmismo generado se traduce en un descenso notable de la ocupación. Y en la industria, pueden obstruir los sistemas de refrigeración de fábricas que desembocan en el Mediterráneo.

El informe de Boero apunta varias sugerencias. Entre ellas destaca la de incorporar las medusas en la investigación pesquera para ser tratadas igual que los peces, con un seguimiento de la diversidad, el ciclo biológico, las fluctuaciones y el desarrollo de un sistema de alerta temprana de proliferaciones. También sugiere la elaboración de productos basados en estos organismos para la alimentación y la medicina.



APERITIVO a base de ensalada de medusa china.

CORTESÍA DEL RESTAURANTE SANT PAU (SAN POL DE MAR)

Precisamente Carme Ruscalleda, ya en 2008 y a raíz de las plagas detectadas en las playas de Sant Pol de Mar, donde se encuentra su restaurante Sant Pau, se propuso incorporar las medusas a su carta. Desde el punto de vista gastronómico, presentan un aspecto transparente muy atractivo, una consistencia que permite cortarlas en trozos, una textura similar a la de un calamar crudo blando y un fuerte sabor yodado parecido al de un percebe o una ostra. Dado que se trata de un producto delicado que se deteriora rápidamente, se aconseja conservarlas en salazón.

Ruscalleda recurrió entonces al mercado asiático —que conocía bien por sus restaurantes en Tokio—. Elaboró primero una ensalada con la especie *Rhopilema esculentum,* procedente de China. Luego una versión del *empedrat* (ensalada de alubias con bacalao) y una sopa de tomate, medusa e higos, entre otros platos. Poco después llevó a cabo algunas pruebas con la especie mediterránea *Cotylorhiza tuberculata* (popularmente denominada «huevo frito»). Los resultados le entusiasmaron. Pero al intentar adquirir medusas del Mediterráneo topó con la prohibición de consumir este tipo de animal acuático. La legislación europea no lo permitía. Podía utilizar medusas asiáticas de importación pero no las mediterráneas.

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria contempla las medusas del Mediterráneo como un nuevo alimento pero todavía no se ha acreditado. Si se encontraran documentos históricos de su aplicación en la alimentación europea sería más fácil su legalización, pero solo se han hallado textos que demuestran la utilización de anémonas (organismos parecidos pero no coincidentes). El investigador del Instituto Español Oceanográfico Julio Mas asegura que las especies asiáticas guardan una gran semejanza con algunas de las que medran en el Mediterráneo, por lo que sería posible obtener medusas comestibles; sin embargo, para su consumo deberían someterse a procesos laboriosos que garantizaran su seguridad alimentaria.

A la espera de la legalización de las medusas mediterráneas, la incorporación de las asiáticas en Europa se va consolidando. A la de Ruscalleda se han sumado otras iniciativas. El restaurante La Sopa Boba (Alpedrete, Madrid) ofrece varios platos con medusas; el Dos Palillos (Barcelona) también las incluye en su carta, prácticamente desde que abrió en 2008.

Nos hallamos, pues, ante una disyuntiva. Por un lado, interesa el consumo de medusas del Mediterráneo para evitar su proliferación. Por otro, no están legalizadas, puesto que antes debe garantizarse su seguridad alimentaria. Esperemos que se desatasque la situación.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,50€



Para efectuar su pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

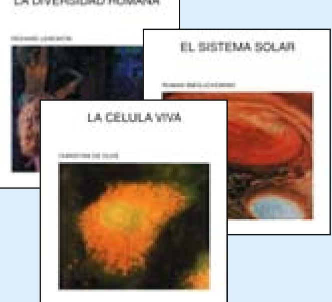
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

- MyC 1: Conciencia y libre albedrío
- MyC 2: Inteligencia y creatividad
- MyC 3: Placer y amor
- MyC 4: Esquizofrenia
- MyC 5: Pensamiento y lenguaje
- MyC 6: Origen del dolor
- MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
- MyC 8: Paradoja del samaritano
- MyC 9: Niños hiperactivos
- MyC 10: El efecto placebo
- MyC 11: Creatividad
- MyC 12: Neurología de la religión
- MyC 13: Emociones musicales
- MyC 14: Memoria autobiográfica
- MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
- MyC 16: Inteligencia emocional
- MyC 17: Cuidados paliativos
- MyC 18: Freud
- MyC 19: Lenguaje corporal
- MyC 20: Aprender a hablar
- MyC 21: Pubertad
- MyC 22: Las raíces de la violencia
- MyC 23: El descubrimiento del otro
- MyC 24: Psicología e inmigración
- MyC 25: Pensamiento mágico
- MyC 26: El cerebro adolescente
- MyC 27: Psicograma del terror
- MyC 28: Sibaritismo inteligente
- MyC 29: Cerebro senescente
- MyC 30: Toma de decisiones
- MyC 31: Psicología de la gestación
- MyC 32: Neuroética
- MyC 33: Inapetencia sexual
- MyC 34: Las emociones *
- MyC 35: La verdad sobre la mentira
- MyC 36: Psicología de la risa
- MyC 37: Alucinaciones
- MyC 38: Neuroeconomía
- MyC 39: Psicología del éxito
- MyC 40: El poder de la cultura
- MyC 41: Dormir para aprender
- MyC 42: Marcapasos cerebrales
- MyC 43: Deconstrucción de la memoria
- MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
- MyC 45: Biología de la religión
- MyC 46: ¡A jugar!
- MyC 47: Neurobiología de la lectura
- MyC 48: Redes sociales
- MyC 49: Presiones extremas
- MyC 50: Trabajo y felicidad
- MyC 51: La percepción del tiempo
- MyC 52: Claves de la motivación
- MyC 53: Neuropsicología urbana
- MyC 54: Naturaleza y psique
- MyC 55: Neuropsicología del yo
- MyC 56: Psiquiatría personalizada
- MyC 57: Psicobiología de la obesidad
- MyC 58: El poder del bebé
- MyC 59: Las huellas del estrés
- MyC 60: Evolución del pensamiento
- MyC 61: TDAH
- MyC 62: El legado de Freud
- MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
- MyC 64: Superstición
- MyC 65: Competición por el cerebro
- MyC 66: Estudiar mejor
- MyC 67: Hombre y mujer

(*) Disponible solo en formato digital









Precio por ejemplar: 6,90€

- Cuadernos 1: El cerebro
- Cuadernos 2: Emociones
- Cuadernos 3: Ilusiones
- Cuadernos 4: Las neuronas
- Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
- Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
- Cuadernos 7: El sueño
- Cuadernos 8: Neuroglía



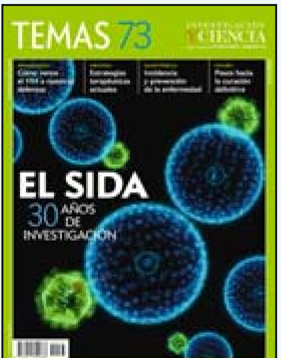
TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

- T-1: Grandes matemáticos *
- T-2: El mundo de los insectos *
- T-3: Construcción de un ser vivo *
- T-4: Máquinas de cómputo
- T-5: El lenguaje humano *
- T-6: La ciencia de la luz
- T-7: La vida de las estrellas
- T-8: Volcanes
- T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
- T-10: Misterios de la física cuántica *
- T-11: Biología del envejecimiento *
- T-12: La atmósfera
- T-13: Presente y futuro de los transportes
- T-14: Los recursos de las plantas
- T-15: Sistemas solares
- T-16: Calor y movimiento
- T-17: Inteligencia viva
- T-18: Epidemias
- T-19: Los orígenes de la humanidad *
- T-20: La superficie terrestre
- T-21: Acústica musical
- T-22: Trastornos mentales
- T-23: Ideas del infinito
- T-24: Agua
- T-25: Las defensas del organismo
- T-26: El clima
- T-27: El color
- T-28: La consciencia *
- T-29: A través del microscopio
- T-30: Dinosaurios
- T-31: Fenómenos cuánticos
- T-32: La conducta de los primates
- T-33: Presente y futuro del cosmos
- T-34: Semiconductores y superconductores
- T-35: Biodiversidad
- T-36: La información
- T-37: Civilizaciones antiguas
- T-38: Nueva genética
- T-39: Los cinco sentidos
- T-40: Einstein
- T-41: Ciencia medieval
- T-42: El corazón
- T-43: Fronteras de la física
- T-44: Evolución humana
- T-45: Cambio climático
- T-46: Memoria y aprendizaje
- T-47: Estrellas y galaxias
- T-48: Virus y bacterias
- T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
- T-50: Newton
- T-51: El tiempo *
- T-52: El origen de la vida *
- T-53: Planetas
- T-54: Darwin
- T-55: Riesgos naturales
- T-56: Instinto sexual
- T-57: El cerebro, hoy
- T-58: Galileo y su legado
- T-59: ¿Qué es un gen?
- T-60: Física y aplicaciones del láser
- T-61: Conservación de la biodiversidad
- T-62: Alzheimer
- T-63: Universo cuántico *
- T-64: Lavoisier, la revolución química
- T-65: Biología marina
- T-66: La dieta humana: biología y cultura
- T-67: Energía y sostenibilidad
- T-68: La ciencia después de Alan Turing
- T-69: La ciencia de la longevidad
- T-70: Orígenes de la mente humana
- T-71: Retos de la agricultura
- T-72: Origen y evolución del universo
- T-73: El sida
- T-74: Taller y laboratorio
- T-75: El futuro de la energía (I)
- T-76: El futuro de la energía (II)

(*) Disponible solo en formato digital



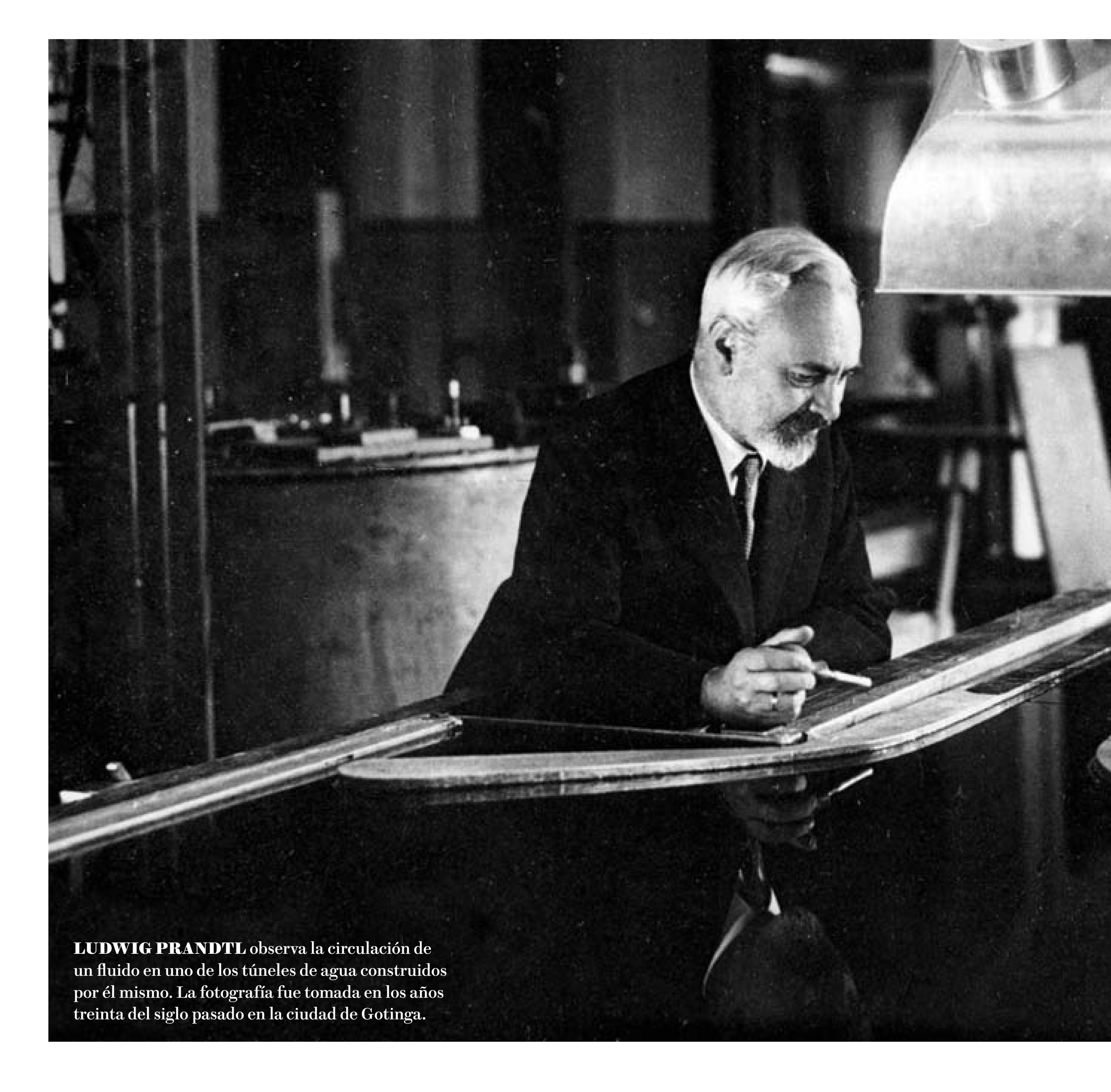






HISTORIA DE LA CIENCIA

Una vida dedicada

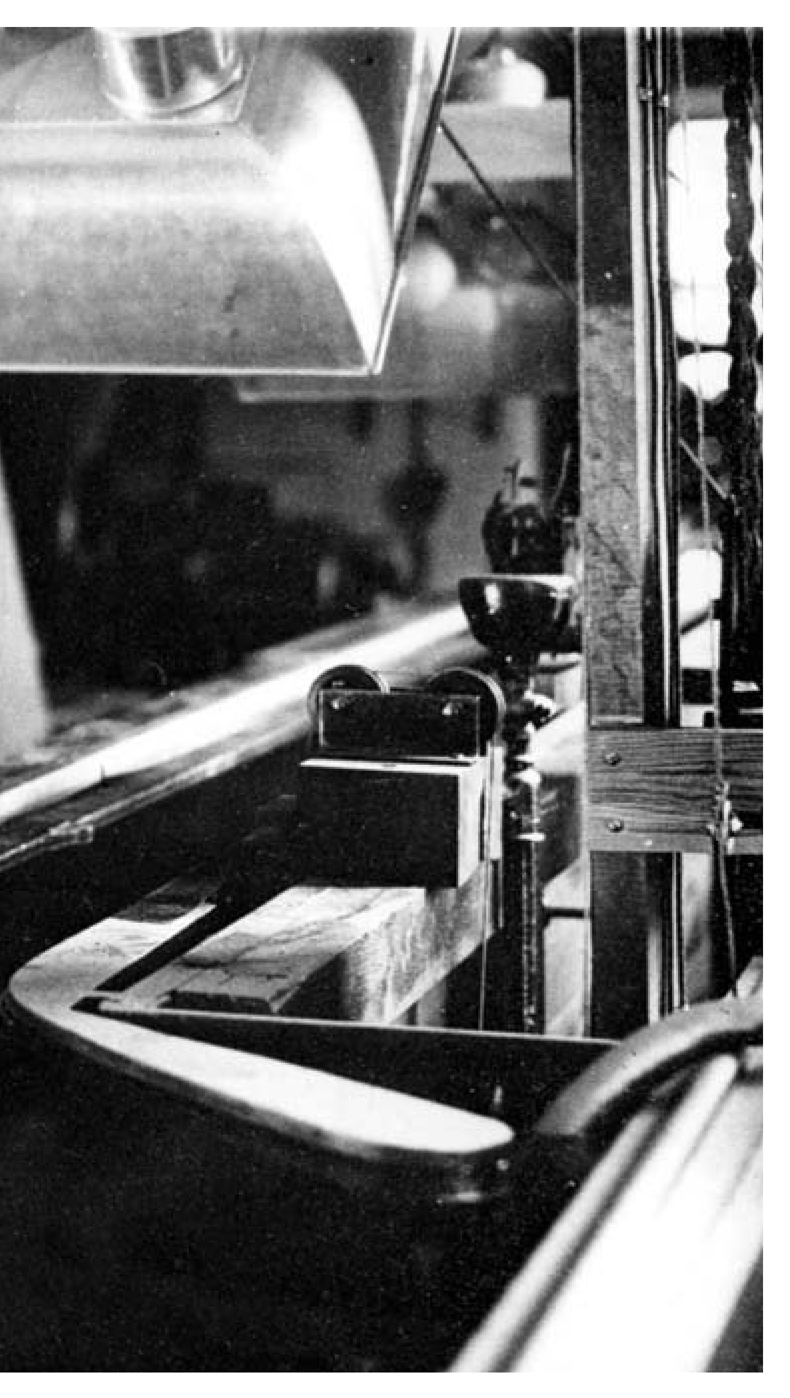


LUDWIG PRANDTL observa la circulación de un fluido en uno de los túneles de agua construidos por él mismo. La fotografía fue tomada en los años treinta del siglo pasado en la ciudad de Gotinga.

a la turbulencia

A comienzos del siglo XX, Ludwig Prandtl se aventuró a estudiar el flujo turbulento en líquidos y gases. Sus investigaciones sentaron las bases para una teoría general del fenómeno

Eberhard Bodenschatz y Michael Eckert



Entre los siglos XVIII y XX, la ciudad de Gotinga fue considerada por los naturalistas como una meca de las matemáticas y la física aplicada. En ella trabajaron eminencias como Carl Friedrich Gauss o Wilhelm Weber. La tradición prosiguió con el matemático Felix Klein, quien en 1895 y 1902 se encargó de atraer, respectivamente, a David Hilbert y Hermann Minkowski, dos de los matemáticos más prominentes de su tiempo. Pero Klein consideraba también fundamentales las disciplinas aplicadas, por lo que en 1904 incorporó al joven Ludwig Prandtl como profesor de física técnica en la Universidad de Gotinga. Al cabo de un año, Prandtl y el matemático Carl Runge serían nombrados directores del recién fundado Instituto de Matemática y Mecánica Aplicada.

¿Quién era Ludwig Prandtl? En 1898 había obtenido su título de ingeniero de máquinas en la Escuela Técnica Superior de Múnich; dos años después, se doctoraba con una tesis sobre la teoría de la elasticidad por la que muy pronto sería considerado una promesa de su disciplina. Más tarde se trasladó a Núremberg, donde trabajó como ingeniero para la empresa de maquinaria MAN. Arnold Sommerfeld, que por aquel entonces comenzaba su carrera como físico teórico, quedó tan fascinado por la tesis doctoral de Prandtl que no tardó en recomendarlo para un puesto en la Escuela Técnica Superior de Hannover. En 1901, el ingeniero de máquinas se convertía así en el profesor universitario más joven de Prusia.

UNA GRAN INTUICIÓN

Prandtl justificó pronto su cargo en Hannover con una original propuesta que, más tarde, pasaría a conocerse con el nombre de teoría de la capa límite. Su experiencia como ingeniero le había llevado a observar que, en las máquinas de extracción de virutas de madera y polvo de lijado, se producían inexplicables pérdidas de presión. «En uno de los grandes dispositivos de

Eberhard Bodenschatz es profesor de física de la Universidad de Gotinga y director del Instituto Max Planck de Dinámica y Autoorganización, en la misma ciudad.

Michael Eckert es doctor en física teórica por la Universidad de Beirut. Experto en historia de la ciencia y la tecnología, trabaja como colaborador científico para el Museo Alemán de Múnich.



conducción de aire de la planta de Núremberg instalé un tubo acampanado para restablecer la presión. Pero esto no llegaba a ocurrir; en su lugar, se producía un desprendimiento de flujo», recordaría años después. Con la idea de investigar aquel fenómeno, el recién nombrado profesor construyó un túnel de agua, hoy conservado en el Museo Alemán de Múnich. Una rueda accionada a mano ponía el fluido en movimiento y, sobre una placa, se disponían una serie de objetos que quedaban así expuestos al fluido. A fin de visualizar el flujo y la formación de vórtices, Prandtl coloreaba el agua con hierro micáceo.

El investigador puso especial atención a lo que sucedía en los bordes de los objetos. Supuso que, al rodear un cuerpo, un fluido se pegaría a las paredes. En el caso de sustancias con poca viscosidad, a escasa distancia de la pared, la velocidad del fluido igualaba la del flujo libre. Por tanto, la velocidad debía aumentar de manera abrupta en una zona de transición muy estrecha. Solo en esa fina capa repercutiría la viscosidad, o el rozamiento interno de las partículas del fluido; fuera de ella, el sistema quedaría bien descrito por un fluido ideal.

El hallazgo simplificó de manera notable la descripción matemática de los fluidos reales. Prandtl dedujo las ecuaciones diferenciales simplificadas que describían el efecto del rozamiento en la capa límite. Aunque intrincadas, estas resultaban más fáciles de tratar que las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos reales. Formuladas hacia 1825 por el ingeniero francés Claude Louis Marie Henri Navier y el físico irlandés George Gabriel Stokes, dichas ecuaciones incluyeron por primera vez el efecto de la viscosidad en el comportamiento de líquidos y gases.

Prandtl expuso su teoría en agosto de 1904, durante el tercer Congreso de Matemáticas de Heidelberg. Durante su ponencia, el investigador describió así los procesos que acontecían en los bordes: «Se desprende una capa de líquido que, debido al rozamiento con la pared, avanza en rotación hacia el fluido libre». Prandtl siempre consideró que las matemáticas no eran más que un medio para alcanzar un fin. Según él, el primer paso de cualquier investigación debía consistir en hacerse «con una intuición lo más detallada posible» del fenómeno. «Las ecuaciones llegan más tarde, cuando creo haber entendido las cosas», escribió en 1948 en una retrospectiva sobre su modo de teorizar.

La ponencia de Prandtl fue profusa en imágenes del túnel de agua pero parca en ecuaciones. Ello sorprendió a algunos de los asistentes a la conferencia; a Klein, sin embargo, le pareció «la más bonita del congreso», recuerda Sommerfeld. Klein reconoció enseguida el alcance del método de Prandtl. Le admiraba que, además de sus conocimientos de ingeniería y su dominio del aparato matemático, el investigador mostrase «una excelente intuición y originalidad de pensamiento», tal y como hizo saber al Ministerio de Cultura prusiano con motivo del puesto por el que Prandtl se trasladó a Gotinga.

Poco después, Klein encomendó a Prandtl la planificación de un centro de investigación aerodinámica. Por encargo de la industria, este se destinaría a estudiar modelos de dirigibles en un túnel de viento. Prandtl diseñó allí las mejores instalaciones experimentales de su vida. Todavía hoy, tales construcciones reciben el nombre de «túneles de viento de Gotinga». El Centro de Investigación de Modelos de la Sociedad de Estudios de Dirigibles Motorizados comenzó su andadura en noviembre de 1907, con Prandtl como director.

TURBULENCIA EN LA CAPA LÍMITE

Así pues, a comienzos del siglo xx Prandtl se encontraba a caballo entre la vanguardia técnica de la época y la tradición académica de la Universidad de Gotinga. Entre sus primeros alumnos se contaban el húngaro Theodore von Kármán y el alemán Heinrich Blasius, quienes pronto se darían a conocer por sus notables contribuciones a la mecánica de fluidos. En su tesis doctoral, Blasius calculó el perfil de velocidad de la capa límite sobre una placa lisa. Por su parte, Von Kármán analizó la estabilidad de los vórtices generados tras un cilindro uniforme sumergido en un fluido.

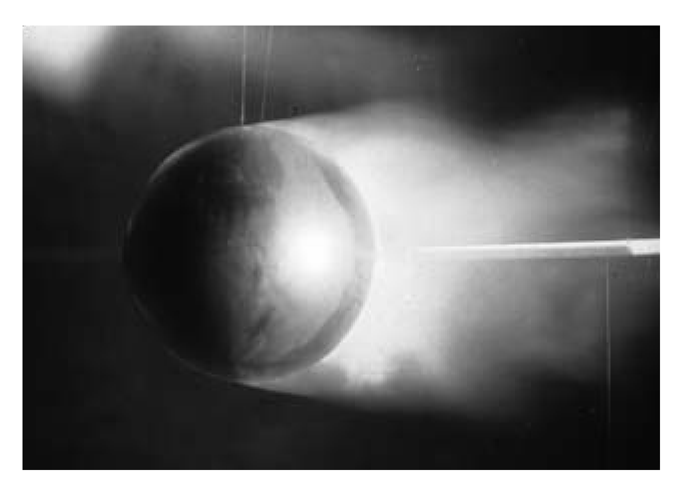
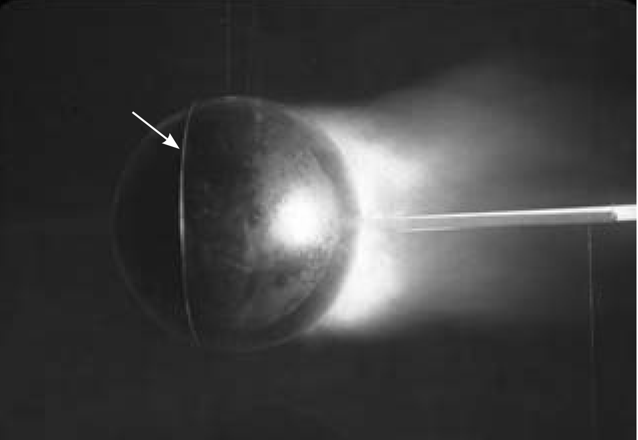
Antes de que estallara la Primera Guerra Mundial, ya se intuía que había surgido una escuela de investigación peculiar, enfocada a la técnica pero sin desmerecer por ello la tradición matemática y física de Gotinga. Los experimentos en el túnel de viento llevaron a los investigadores a deducir dos causas de la resistencia aerodinámica: la «resistencia de forma», que derivaba de los vórtices generados tras el objeto y que variaba con su geometría, y la «resistencia de superficie», dependiente de la naturaleza

EN SÍNTESIS

A principios del siglo xx, el físico alemán Ludwig Prandtl introdujo el concepto de capa límite: una noción clave en aerodinámica que simplificaba de manera notable la descripción matemática de los fluidos reales.

La aparición de vórtices turbulentos en el seno de la capa límite no resultaba fácil de explicar. La complejidad del problema atrajo a científicos de la talla de Werner Heisenberg, Lars Onsager y Andréi Kolmogórov.

Prandtl formuló una teoría general de la turbulencia hacia los últimos años de la Segunda Guerra Mundial. Como consecuencia del conflicto, buena parte de sus contribuciones han permanecido en la sombra hasta hace poco.

AL COLOCAR UN ALAMBRE (*flecha*) **en el hemisferio delantero de una esfera emplazada en un túnel de viento, la capa límite de la parte trasera se vuelve turbulenta, se pega más a la superficie del objeto y genera algunos vórtices. Como consecuencia, la resistencia aerodinámica disminuye.**

ARCHIVO DEL CENTRO AEROESPACIAL ALEMÁN

de los bordes. En el caso de los modelos de dirigibles, su diseño reducía hasta tal punto la resistencia de forma que únicamente sobrevivía el rozamiento a lo largo de la superficie. Por el contrario, en el caso de esferas u otros cuerpos no aerodinámicos, actuaba sobre todo la primera.

Sin embargo, cuando Prandtl comparó sus medidas de la resistencia en esferas con los datos obtenidos por el ingeniero Gustav Eiffel en París, salieron a la luz grandes discrepancias. La resistencia medida en el túnel de viento de Gotinga superaba en más del doble a la calculada por Eiffel. Una diferencia tan acusada entre cuerpos de formas similares no podía responder a las posibles diferencias entre sus superficies.

Prandtl visitó el laboratorio parisino en otoño de 1913, donde pudo comprobar que Eiffel había estado empleando velocidades de flujo más elevadas. Para esclarecer el fenómeno, el alemán incorporó al túnel de viento de Gotinga un estrechamiento que actuaba como una boquilla que aceleraba la corriente de aire. Las primeras medidas obtenidas con el túnel modificado confirmaron los resultados de Eiffel. Así pues, Prandtl dedujo que el comportamiento de la resistencia variaba de manera repentina cuando la velocidad del fluido superaba cierto umbral crítico. El físico concluyó que, para velocidades bajas, un flujo laminar se volvía turbulento al superar dicho umbral. La capa límite turbulenta succionaba más flujo y se adhería durante más tiempo a la superficie de la esfera, lo que provocaba que se formasen menos vórtices tras el objeto y, con ello, que la resistencia disminuyese.

NÚMEROS DE REYNOLDS

A primera vista, parece paradójico que la transición de un régimen laminar a uno turbulento implique una disminución de la resistencia aerodinámica. Para poner a prueba su hipótesis, Prandtl introdujo en el túnel de viento una esfera en la que dispuso un fino alambre circular en su parte delantera; los vórtices generados por aquel alambre se encargarían de que la capa límite se volviera turbulenta. Y, en efecto, vio cómo la estela de vórtices se contraía y la resistencia se reducía.

Sin embargo, las características matemáticas de ese flujo turbulento no se dejaban calcular con facilidad. El empuje definitivo hacia una explicación teórica llegaría algo más tarde de mano de la hidráulica. Tras licenciarse, Blasius había obtenido en Berlín un puesto en el Centro Prusiano Experimental de Ingeniería Hidráulica y Construcción Naval. Se ocupaba, según escribió a Prandtl en 1911, de expresar los datos de la resistencia hidráulica por rozamiento en función del número de Reynolds. Por «resistencia hidráulica» se conocía en aquel entonces la que aparecía en un conducto de agua cuando el flujo dejaba de ser laminar y se hacía turbulento. Por su parte, el británico Osborne Reynolds había descubierto en 1883 que la transición entre un régimen y otro dependía de manera clave de cierta cantidad adimensional: la velocidad del flujo multiplicada por el diámetro del conducto y dividida por la viscosidad.

Blasius descubrió que la ley de la resistencia hidráulica podía expresarse como una función simple del número de Reynolds. No obstante, dicha fórmula solo describía los datos de forma empírica; no iba asociada a ninguna teoría física. «Usted pregunta por la deducción teórica de la ley de la resistencia de Blasius en conductos», respondía Prandtl en 1923 a un colaborador. «¡El que la encuentre se hará famoso!»

Prandtl y Kármán, por entonces director del Instituto Aerodinámico de la Escuela Técnica Superior de Aquisgrán, trataban de obtener, a partir de la fórmula de Blasius, algún indicio de la esquiva teoría. Dedujeron que la velocidad media del flujo en la capa límite turbulenta aumentaba como la raíz séptima de la distancia a la pared. Por un tiempo, dicha ley gozó de validez como posible modelo hacia una teoría de la turbulencia, si bien los experimentos mostraban que perdía vigencia para números de Reynolds muy elevados. En algunos casos, una relación logarítmica parecía ajustarse mejor a los datos y a las suposiciones teóricas.

A partir de ese juego entre fórmulas empíricas e hipótesis físicas, hacia 1930 surgieron varias teorías que, aunque daban excelentes resultados en la práctica ingenieril, no se dejaban deducir a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. En la teoría de Prandtl participaba una magnitud denominada «longitud de mezcla», correspondiente a la distancia media recorrida por un vórtice en un flujo turbulento hasta que perdía su cantidad de movimiento. Sin embargo, para poder aplicar dicha idea a la descripción del fenómeno, era necesario realizar suposiciones adicionales sobre el comportamiento del fluido. Una teoría completa de la turbulencia estaba aún lejos. Dicha carencia persiste aún hoy, por lo que el concepto de longitud de mezcla de Prandtl

sigue empleándose en algunas situaciones. Por ejemplo, facilita la simulación de fenómenos astrofísicos en los que interviene el transporte turbulento de momento y calor.

Así, aunque para describir un flujo turbulento existían algunas fórmulas semiempíricas para la resistencia y la velocidad media del fluido, la transición de un régimen laminar a uno turbulento continuaba planteando un misterio indescifrable. A comienzos del siglo xx se llevaron a cabo reiterados intentos para tratar matemáticamente la cuestión como un problema de estabilidad: cuando, en un flujo laminar, una perturbación ondulatoria se amortiguaba con el tiempo, la corriente permanecía estable; por el contrario, si la amplitud de la onda aumentaba, el flujo se tornaba turbulento. A partir de tales consideraciones, se pretendía deducir para qué clase de perturbaciones y para qué números de Reynolds un flujo laminar efectuaba la transición al régimen turbulento. Sin embargo, teoría y práctica se negaban a encajar.

UN FENÓMENO UNIVERSAL

En 1922, un colaborador de Kármán envió una carta a Prandtl en la que anunciaba «una noticia sensacional» procedente de Múnich. Al parecer, uno de los niños prodigio de la escuela de Sommerfeld —que más tarde se haría famoso por sus contribuciones a la teoría cuántica, Werner Heisenberg— había «esclarecido el problema de la turbulencia». Sin embargo, aunque Heisenberg había deducido en su tesis doctoral un límite de estabilidad para números de Reynolds elevados, este no era válido para todas las longitudes de onda de las perturbaciones.

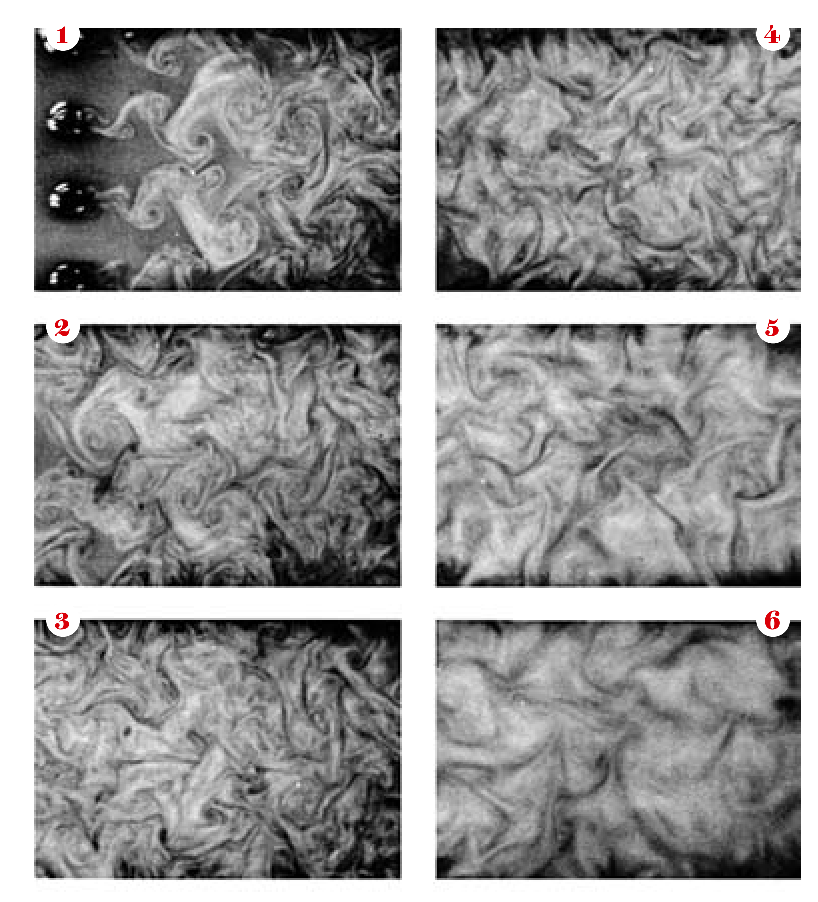
Mientras que los resultados de Heisenberg solo gozaron de un éxito parcial, Walter Tollmien, estudiante de Prandtl, pre-



EN LA DÉCADA DE LOS SETENTA se llevó a cabo una reconstrucción del túnel de viento diseñado por Prandtl en 1935 (*arriba*). En la actualidad, esta se exhibe junto a un túnel de viento moderno en el Instituto Max Planck de Dinámica y Autoorganización de Gotinga (*abajo*).



INSTITUTO MAX PLANCK DE DINÁMICA Y AUTOORGANIZACIÓN DE GOTINGA



A FIN DE VISUALIZAR la formación de un flujo turbulento, Prandtl coloreó con hierro micáceo el agua que pasaba entre unos barrotes (*arriba a la izquierda*). Entre cada una de estas imágenes, tomadas a una distancia creciente de los barrotes, media un intervalo temporal de 1,35 segundos.

DE: *PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONGRESS ON APPLIED MECHANICS HELD AT HARVARD*, PÁG. 344. JOHN WILEY & SONS 1938, WILEY-VCH WEINHEIM 1939

sentó cinco años después una teoría contundente. En el curso de su doctorado había analizado la estabilidad de un perfil de velocidades similar al de la capa límite laminar sobre una placa lisa. Sus resultados indicaban, para cada longitud de onda de la perturbación y para cada número de Reynolds, si la perturbación permanecía estable o no. El umbral de inestabilidad se situaba en valores tan bajos que no parecía realista, pero, si se suponía que este solo marcaba el casi imperceptible inicio de la turbulencia, su teoría no resultaba tan descabellada.

Pocos años más tarde, Hermann Schlichting, también discípulo de Prandtl, describió la manera en que, al atravesar el umbral de inestabilidad, las perturbaciones en la capa límite se amplificaban y volvían a atenuarse. Pero Schlichting no consiguió demostrar su teoría experimentalmente, por lo que sus resultados no despertaron gran interés más allá de la escuela de Prandtl. La mayoría de los investigadores consideraron la inestabilidad de Tollmien-Schlichting como una descripción más bien improbable de la transición al régimen turbulento.

Todavía faltaba un largo camino por recorrer antes de que la comunidad se percatarse de que la turbulencia constituía, en realidad, un fenómeno universal que podía describirse con las herramientas de la física estadística. El hallazgo llegó de la mano del matemático ruso Andréi Nikoláyevich Kolmogórov en 1941, en plena Segunda Guerra Mundial, si bien sus resultados no se darían a conocer en Occidente hasta 1945. Ese mismo año, las investigaciones independientes de Prandtl y, poco después, las del noruego Lars Onsager, Heisenberg y Carl Friedrich von Weizsäcker llegaron a las mismas conclusiones.

Hoy sabemos que, suficientemente lejos de los objetos que la provocan (paredes, hélices, rejillas), la turbulencia desencadena una «cascada de energía»: la energía que tales objetos transmiten al fluido se concentra en dominios cada vez menores; como consecuencia, los grandes vórtices iniciales se subdividen en otros de menor tamaño. En un principio, el fenómeno se rige únicamente por las fuerzas de inercia; solo cuando un vórtice se hace lo suficientemente pequeño, su energía se transforma en calor por disipación viscosa.

En su búsqueda de una teoría estadística de la turbulencia, Prandtl logró importantes contribuciones. Desde 1923 mantuvo un estrecho contacto con Geoffrey Ingram Taylor, experto en dinámica de fluidos del Trinity College de Cambridge. Ambos tuvieron acceso a los mejores datos disponibles en el período de entreguerras; no solo a aquellos de los laboratorios de Gotinga y Cambridge, sino también a los de Delft, en Holanda, y la Oficina Nacional de Estándares de Estados Unidos. En sus experimentos, los investigadores utilizaron sondas de hilo caliente: un fino alambre calentado por medio de una corriente eléctrica, cuyo grado de enfriamiento depende de la velocidad local del aire que circula por el túnel de viento. Para compensarlo, debe incrementarse el voltaje al que se somete el hilo, gracias a lo cual pueden describirse con fidelidad las variaciones de velocidad que tienen lugar en el régimen turbulento. En 1932, Taylor escribió a Prandtl que estaba particularmente interesado en las características espectrales de la turbulencia; es decir, en la manera en que la energía se distribuía entre los vórtices de diferentes tamaños. Prandtl le respondió enseguida: acababa de observar algunas relaciones de ese tipo en experimentos con dos hilos calientes.

En una serie de artículos sobre la teoría estadística de la turbulencia publicados en 1935, Taylor introdujo la turbulencia isótropa; es decir, aquella que se transmite por igual en todas las direcciones. De nuevo, el concepto surgió por razones prácticas: para obtener medidas fiables, el aire debía fluir alrededor del objeto de la forma más uniforme posible. A partir de un análisis estadístico de las variaciones de la velocidad, Taylor obtuvo fórmulas sobre la intensidad de las corrientes turbulentas. En un homenaje a Prandtl con motivo de su sexagésimo cumpleaños, se publicó un volumen al respecto en el que Taylor —el único investigador de origen no alemán— contribuyó con un artículo.

Tres años después, en un congreso internacional de mecánica en Cambridge, Massachusetts, se celebró un simposio presidido por Prandtl. En él, el investigador presentó los datos sobre las variaciones de velocidad que había obtenido gracias a un túnel de viento construido a tal efecto. Prandtl distinguió cuatro fenómenos: turbulencia de pared, turbulencia libre, turbulencia en fluidos estratificados y disipación de la turbulencia isótropa. Para este último caso propuso una serie de ecuaciones, las cuales pudo comprobar experimentalmente al medir las fluctuaciones

EL 31 DE OCTUBRE DE 1944, Prandtl fechó una elegante «Teoría de la propagación de la turbulencia». Esta, sin embargo, aún no incluía el efecto de la viscosidad.

de velocidad que aparecían tras una rejilla sumergida en un flujo de aire. También mostró imágenes de los vórtices de agua generados tras una rejilla, obtenidas gracias a la coloración del líquido con hierro micáceo. En aquellas fotografías se apreciaba con claridad que el tamaño de los vórtices contradecía las conclusiones de la teoría de Taylor. Una vez más, los métodos de Prandtl se caracterizaban por la sencillez con que ponían a prueba las ideas teóricas.

Visto en retrospectiva, el aspecto más relevante del discurso de Prandtl concernía a las variaciones de la velocidad media del fluido causadas por el rozamiento con las paredes de un túnel de flujo. Aquellos valores, obtenidos gracias a un refinado dispositivo electromagnético, mostraban la misma distribución espectral de energías que se observaba en la turbulencia producida en el centro del túnel de viento. Más tarde, Prandtl obtuvo nuevas conclusiones teóricas a partir de aquellos datos: en la primavera de 1945, poco después de su septuagésimo cumpleaños, comprendió el significado universal de la cascada de energía en los flujos turbulentos.

Tras estallar la Segunda Guerra Mundial, el científico de Gotinga perdió el contacto con Cambridge y otras instituciones. Quizá por ello, la exposición de Prandtl en el congreso de mecánica de 1938 no tuvo mayor repercusión internacional. A pesar de todo, los experimentos de Prandtl ya habían puesto de manifiesto el carácter universal de la turbulencia que Kolmogórov justificaría desde una perspectiva teórica en su revolucionario trabajo de 1941.

MANUSCRITOS INÉDITOS

Cuando las tropas estadounidenses tomaron Gotinga el 8 de abril de 1945, Prandtl acababa de plasmar en su manuscrito «Sobre la influencia de la viscosidad en el mecanismo de formación de la turbulencia» las ideas que más tarde pasarían a la historia como teoría de Kolmogórov. Prandtl fechó la versión final del trabajo el 4 de julio de 1945. Escasas semanas después de finalizar la guerra, su centro de investigación quedó bajo la supervisión de las tropas británicas. Tanto a Prandtl como a otros científicos de renombre se les exigió que redactaran informes para las potencias ocupantes sobre las investigaciones que habían estado llevando a cabo durante el conflicto. Dada la imposibilidad de seguir con su actividad investigadora, Prandtl protestó sin éxito ante el presidente de la Real Sociedad de Londres. Cuando, en enero de 1946, Heisenberg y Weizsäcker quedaron en libertad tras su internamiento en la casa de campo inglesa Farm Hall y se trasladaron a Gotinga, Prandtl supo de sus teorías. Al ver que eran muy similares a la que él había formulado, prescindió de publicar su manuscrito.

En septiembre de 1946 se celebró en París el primer congreso de mecánica tras la guerra. Al poner en común los avances en la investigación de la turbulencia, se habló de la «notable coincidencia» de las teorías de Kolmogórov, Onsager, Weizsäcker y Heisenberg; sin embargo, no se mencionó a Prandtl. Por lo visto, nadie conocía los resultados que este había obtenido durante los últimos meses de la contienda.

Gracias a otros manuscritos de Prandtl, hoy podemos reconstruir con bastante fidelidad aquella etapa de sus investigaciones. Ya en octubre de 1944, el físico obtuvo la formulación completa de una teoría que publicó junto con su colaborador Karl Wieghardt en un trabajo titulado «Sobre un nuevo sistema de fórmulas para el régimen turbulento». En él describía, mediante una ecuación diferencial, las variaciones temporales de la energía en un flujo turbulento. Y aunque la cuestión sobre el papel de la viscosidad quedaba aún abierta, Prandtl llegó pronto a una conclusión: el tamaño de las «esferas de turbulencia» debía disminuir gradualmente en cascada hasta que, al alcanzar la menor dimensión posible, cedieran su energía en forma de calor a causa de la viscosidad. Hoy conocida como longitud de Kolmogórov, esa escala de distancias ya figuraba entre los datos del manuscrito de Prandtl del 29 de enero de 1945. El hecho de que decidiera fecharlo demuestra que era consciente del alcance de su resultado. A partir del manuscrito inédito de julio de 1945, así como de otras anotaciones, se desprende que todavía no estaba satisfecho del todo. Se empeñaba ante todo en obtener una deducción más estricta de la longitud de Kolmogórov, algo que acabaría convirtiéndose en el objetivo fundamental de otros manuscritos posteriores.

Al revisar aquella etapa investigadora, parece evidente que la aportación decisiva llegó sobre todo con los datos del túnel de viento que Heinz Motzfeld —otro doctorando de Prandtl cuyas contribuciones han pasado inadvertidas hasta ahora— presentó en el congreso de 1938. Así pues, habría sido entonces, antes incluso de la publicación del trabajo de Kolmogórov de 1941, cuando se alcanzó el verdadero punto de inflexión en la búsqueda de principios universales para describir la turbulen-

ARCHIVO DEL CENTRO AEROESPACIAL ALEMÁN

EN SU TRABAJO «Inclusión de la viscosidad», Prandtl dedujo por primera vez lo que más tarde pasaría a conocerse como longitud de Kolmogórov (representada en el texto mediante la letra λ). Entre otras propiedades, esta magnitud dicta la forma en que los vórtices de gran tamaño se descomponen en otros menores.

ARCHIVO DEL CENTRO AEROESPACIAL ALEMÁN

cia. En todo caso, establecer de manera definitiva semejante conclusión requeriría efectuar un análisis más detallado de los escritos de Prandtl.

POLÍTICA Y CIENCIA: UN TRISTE FINAL

Una disciplina tan ligada a las aplicaciones prácticas como la mecánica de fluidos no se desarrolló en una torre de marfil. El centro de experimentación de Prandtl, que ya se había ampliado de manera considerable durante la Primera Guerra Mundial, fue rebautizado en 1919 como Centro de Experimentación Aerodinámica (AVA, por sus siglas en alemán). En 1925, Prandtl se hizo cargo de la dirección uno de los institutos Kaiser Wilhem (KWI), fundado para él y dedicado a la mecánica de fluidos. Tras el ascenso de Hitler al poder, las instalaciones científicas de Prandtl gozaron de un notable auge. El AVA se benefició de la financiación de un gran túnel de viento por parte del régimen y quedó en 1937 bajo la dirección de Albert Betz, discípulo de Prandtl. Con el tiempo, Prandtl se centró en el KWI, aunque sin romper las relaciones con su antigua institución.

«Los estudios sobre mecánica de fluidos deben guardar relación con las investigaciones de la Fuerza Aérea, a fin de aclarar los principios físicos necesarios para su aplicación militar y facilitar el desarrollo básico de nuevos métodos», exigía en 1938 Hermann Göring, comandante jefe de la Fuerza Aérea alemana. Prandtl obedeció y, durante la guerra, asumió un papel decisivo en la política investigadora del Ministerio de Aviación.

Gracias a la buena reputación de la que gozaba Prandtl tanto en Alemania como en el extranjero, se le asignó una función destacada que él aceptó de buen grado. Y, aunque no se afilió al Partido Nazi, sus investigaciones para la Fuerza Aérea alemana lo volvieron cada vez más cómplice del régimen. Prandtl no veía ninguna contradicción en criticar ciertas medidas nacionalsocialistas, como el despido de los científicos judíos de las universidades, y, al mismo tiempo, defender al régimen de las críticas externas. Cuando Taylor le reprochó en 1938 que no era consciente de la clase de «loco criminal» que gobernaba su país, Prandtl replicó que debería visitar Alemania para convencerse de las bondades de su mandato. Según el científico, lo único que pretendía Hitler con su política era eliminar «los últimos restos del Tratado de Versalles». Aun cuando el dictador invadió Polonia y desencadenó la Segunda Guerra Mundial, Prandtl reclamaba comprensión. El 7 de marzo de 1945 escribía, en una carta dirigida a Göring, sobre la «esperada victoria final».

Por su parte, Kármán había emigrado a Estados Unidos, donde en los años treinta había fundado en el Instituto de Tecnología de California un centro de investigación que seguía el modelo de Gotinga. «Muestra un aire triste», escribió sobre su reencuentro con Prandtl después de la guerra. Taylor, antiguo amigo de Prandtl, lo ignoraba cuando este trataba de ponerse en contacto con él.

Tampoco la teoría de la turbulencia de Prandtl tuvo un final feliz. Los éxitos que consiguió durante los últimos meses de guerra permanecieron inéditos. En 1949 hizo una ligera alusión al respecto en la tercera edición de su libro de texto *Guía sobre la teoría de flujos*, aunque casi nadie pudo reconocer en esas pocas explicaciones la esencia del esfuerzo que, durante años, le habían llevado a intentar entender la turbulencia. Mientras que, en 1946, los hallazgos de Onsager, Weizsäcker y Heisenberg se proclamaban como destacados logros junto a la teoría de Kolmogórov, la contribución de Prandtl ha permanecido en la sombra hasta hoy.

PARA SABER MÁS

Die aerodynamische Versuchsanstalt in Göttingen, ein Werk Ludwig Prandtls: Ihre Geschichte von den Anfängen bis 1925. J. C. Rotta. J. C. Vandenhoeck & Ruprecht, Gotinga, 1990.

Ludwig Prandtl, ein Lebensbild: Erinnerungen, Dokumente. J. Vogel-Prandtl en *Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung*. Gotinga, 1993.

The dawn of fluid dynamics: A discipline between science and engineering. M. Eckert. Wiley-VCH, Berlín-Weinheim, 2006.

Prandtl and the Göttingen school. E. Bodenschatz y M. Eckert en *A voyage through turbulence*, dirigido por P. A. Davidson et al. Cambridge University Press, 2011. Versión disponible en **arxiv.org/abs/1107.4729**

EN NUESTRO ARCHIVO

El enigma de Osborne Reynolds. Álvaro Meseguer y Fernando Mellibovsky en *IyC*, marzo de 2010.

Célula Couette-Taylor. Marc Boada en *IyC*, octubre de 2008.



SOSTENIBILIDAD

Reutilización de aguas residuales

El agua de alcantarilla tratada podría convertirse en la fuente más segura y sostenible de agua corriente, si se vence el rechazo social

Olive Heffernan

LINDA KEIL, HALLEY RESOURCES (*diseño*); SAM KAPLAN (*fotografía*)

UN SOLEADO DÍA DE DICIEMBRE VISITO UNA RELUCIENTE INSTALACIÓN DE PROCESAMIENTO de aguas enclavada en las colinas del norte de San Diego, en California. Protegidos por un feo techo de color crema carente de paredes, los equipos de este enorme laboratorio brillan bajo el cálido sol invernal. Desde cualquier ángulo pueden verse hileras de tubos plateados, bombonas de diversos tamaños y formas, y grandes tanques de metal gris. Cuando mi recorrido por la planta llega a su fin, me proponen una prueba: identificar, a simple vista, el contenido de tres botellas de cristal llenas de líquidos claros que colocan ante mí. La primera presenta un tenue matiz amarillo. La segunda es incolora. La tercera resplandece como un diamante bien cortado.

Completo la tarea con facilidad, identificando el contenido de cada botella, en orden, como agua del grifo, agua procedente de una planta de tratamiento clásica y agua residual doméstica con un alto grado de depuración producida en la instalación. Me asombra no solo el deseo irresistible de beber agua de alcantarilla tratada, sino también el hecho de que esté prohibido. «No se nos permite probarla, ni tampoco que lo hagan los visitantes», comenta Marsi A. Steirer, mi guía y directora adjunta del Departamento de Servicios Públicos de la ciudad de San Diego, que también gestiona la planta.

Esta prohibición podría cambiar pronto. Un proyecto piloto de seis años que supervisó Steirer y que finalizó en 2013 en esta instalación demostró que el agua regenerada no solo es más limpia que el agua potable actual, sino que puede obtenerse con

menores costes que con otras opciones, como la desalinización. Para San Diego, el proceso supondría una revolución siempre y cuando los organismos reguladores estatales lo autoricen.

La ciudad importa el 90 por ciento de su agua del río Colorado, al este, y del delta del río Sacramento-San Joaquín, al norte. Sin embargo, ambas fuentes se están secando y el precio del agua importada se duplicará en la próxima década. Mediante la regeneración de los efluentes, San Diego satisfaría el 40 por ciento de sus necesidades hídricas diarias. Además, se pondría fin a los vertidos en el océano de aguas residuales mal procesadas.

Pero afrontémoslo: no todo el mundo está dispuesto a beber agua de alcantarilla tratada. Este «factor de asco» desbarató, a finales de los años noventa del siglo xx, un intento de iniciar un proyecto similar en San Diego, y en 2004 una encuesta reveló que el 63 por ciento de los residentes aún se oponían a la idea de la reutilización. Numerosas propuestas en Australia han corrido la misma suerte, vetadas por asociaciones civiles. Laurence Jones, fundador del grupo australiano «Ciudadanos en contra de beber aguas negras», cuestiona si las aguas procedentes de hospitales, industrias, hogares y mataderos podrán depurarse alguna vez por completo. «Lo que sí sabemos es que los efluentes están contaminados al cien por cien», afirma.

No obstante, San Diego ha experimentado un asombroso cambio de actitud conforme se agravan las sequías y crecen las vecindades costeras. Ahora, casi tres cuartas partes de la población está a favor de consumir aguas negras tratadas, pero con una condición: que el efluente depurado se devuelva a un embalse para diluirlo y que luego la mezcla se someta a un tratamiento adicional antes de abastecer a los hogares.

Este proceso se conoce como reutilización potable indirecta. Los que dirigen la planta de depuración avanzada de San Diego, que en la actualidad sirve como banco de pruebas para este método, esperan dar un paso más: obtener efluentes con un alto grado de pureza y distribuirlos a la red de abastecimiento, lo que se denomina reutilización potable directa. Sin embargo, para muchos residentes, esta última pretensión va demasiado lejos.

El método que más convenza determinará lo que aprobarán los legisladores para San Diego y el resto de California. Y si se autoriza la reutilización directa allí, donde las normas medioambientales son de notoria rigidez, el proceso podría extenderse pronto a otras regiones del planeta afectadas por la sequía. «California suele influir en las decisiones ambientales a escala mundial», declara el experto internacional en hidrología Shane Snyde, de la Universidad de Arizona, «y lo mismo ocurrirá con el tratamiento de aguas residuales».

CUANTO MÁS LIMPIA, MEJOR

Todos los ojos están puestos en la planta piloto de San Diego. La instalación produce en la actualidad casi 4000 metros cúbicos de agua al día. Aunque se depura hasta alcanzar los parámetros de calidad exigidos para uso potable, se destina a regar el cercano campo de golf de Torrey Pines y un cementerio. Steirer quiere multiplicar por diez la capacidad actual de aquí a entre cinco y diez años. El plan por defecto prevé descargar el agua tratada en el embalse de San Vicente para diluirla; después, la mezcla se potabilizaría y distribuiría a los hogares. El plan B, si los legisladores lo permiten, consistirá en la reutilización directa.

Sin embargo, las leyes no bastarán para que alguno de los dos métodos obtenga el visto bueno de la opinión pública. La instalación debe conseguir que los consumidores venzan la aprensión. Sobre todo, debe convencerlos de que el agua es limpia. La planta ha recibido más de 4000 visitas, entre ellas de madres de familia, jóvenes, médicos y funcionarios electos. Muchos cuestionan la seguridad de beber lo que antes han sido aguas negras. No se trata de una preocupación trivial. Diecinueve millones de estadounidenses enferman al año, y novecientos mueren, a causa de los virus, bacterias y parásitos presentes en el agua que se ha sometido al tratamiento rutinario empleado por la mayoría de los municipios.

Una forma de ganarse a la población es garantizar que el agua resultante es más pura que el suministro actual. Durante el recorrido por las instalaciones, los visitantes descubren que el efluente depurado es, irónicamente, más limpio que el agua del grifo. Ello se debe a que la mayoría de nosotros bebemos «aguas abajo»; los ríos o los lagos de donde se capta el agua corriente también sirven como medio receptor de los vertidos de las depuradoras tradicionales, que no son aptos para beber. «El agua del río Misisipi ya se ha usado cinco veces para cuando llega a Nueva Orleans», explica George Tchobanoglous, experto internacional en hidrología de la Universidad Davis de California. Pero la gente espera que el agua procedente de los efluentes esté sujeta a unos parámetros de calidad más restrictivos que los del abastecimiento municipal habitual.

Steirer afirma que el agua depurada en la instalación de San Diego es «mucho más limpia» que la de una estación potabilizadora típica. Es más, almacenar el agua para esta última en embalses o acuíferos acarrea sus propios riesgos, señala David Sedlak, profesor de ingeniería en Berkeley. Los patos y otros animales introducen suciedad en los embalses, y puede filtrarse arsénico de las rocas a las aguas subterráneas. Algunas personas defienden emplear el método directo para suprimir ese riesgo.

El tratamiento tradicional en Estados Unidos consta de dos o tres etapas que eliminan los sólidos en suspensión, seguidas por un proceso de desinfección con cloro. Transformar las olorosas aguas negras en agua corriente prístina requiere una tecnología diferente. La instalación de San Diego toma las aguas residuales



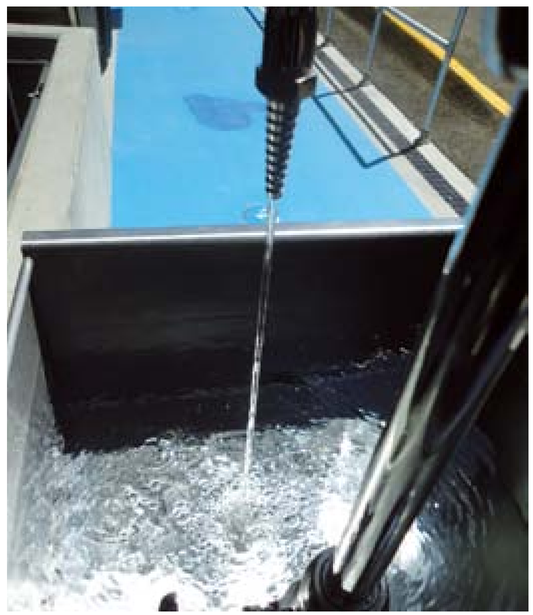
Olive Heffernan es periodista científica especializada en medioambiente. Doctora en ecología marina, fue jefa de redacción de *Nature Climate Change*.

EN SÍNTESIS

El agua potable es un recurso cada vez más escaso y caro para las poblaciones de todo el mundo. Los nuevos procesos de depuración en múltiples pasos podrían ayudar a resolver el problema al convertir las aguas residuales en agua de grifo.

San Diego ha desarrollado un sistema puntero de depuración. Si los organismos reguladores permiten que las aguas residuales tratadas se distribuyan directamente a las redes de abastecimiento, la operación podría servir de ejemplo para muchas ciudades y países.

Sin embargo, el mayor obstáculo radica en persuadir a la sociedad para que supere el rechazo a beber agua residual tratada, aun cuando se ha demostrado que es más limpia que la que se consume hoy en día.

EL PROCESO DE ÓSMOSIS INVERSA, que se lleva a cabo en largos cilindros de color blanco (*izquierda*), elimina las sales y las impurezas microscópicas de cuatro millones de litros de aguas residuales al día en la instalación de depuración avanzada de San Diego. El producto final es casi tan puro como el agua destilada.

CORTESÍA DE LA CIUDAD DE SAN DIEGO

tratadas en la Planta de Tratamiento del Norte de la Ciudad y mejora su descontaminación para hacerlas más «puras».

El primer paso en la planta de depuración avanzada es la microfiltración, que tiene lugar en largos tubos que se asemejan a tambores gigantes. Shane Trussell, presidente de Trussell Technologies y jefe de ingeniería del proyecto, me cuenta que cada tambor contiene 9000 fibras parecidas a espaguetis y que cada una de ellas está perforada por poros microscópicos de un diámetro 300 veces inferior al de un cabello. Cuando se fuerza el agua a circular a través de los tubos, las fibras retienen virus, bacterias, protozoos y sólidos en suspensión.

A continuación, el agua se bombea a alta presión a través de tubos con fibras aún más pequeñas en un proceso conocido como ósmosis inversa. Este paso elimina cualquier partícula disuelta hasta 10.000 veces menor que la bacteria más diminuta, incluidos virus y productos químicos y farmacéuticos. En la etapa final, el agua se somete a un proceso avanzado de oxidación: se mezcla en enormes tanques con cantidades ínfimas de peróxido de hidrógeno concentrado y luego se expone a luz ultravioleta. Este paso destruye cualquier contaminante presente incluso en proporciones de partes por billón, una dosis que equivale a una sola gota en cien piscinas olímpicas.

De los 4000 metros cúbicos de aguas residuales que entran a diario en la planta, el 80 por ciento obtiene la aprobación final: es tan pura como la que embotellan las marcas de primera calidad. Podría descargarse en el embalse de San Vicente si se contara con los permisos para reutilizarla de forma indirecta. En la actualidad, va a parar a las tuberías estatales de color morado que se ven a la vera de ciertas carreteras y que abastecen a la región de agua para riego y uso industrial. El 20 por ciento restante se envía a la planta de aguas residuales de la localidad para su eliminación. Algunas de las sustancias que aparecen con regularidad en esta agua depurada son cafeína, jabón de manos y edulcorantes artificiales, pero en concentraciones tan ínfimas que resultan inocuas, asegura Trussell. El producto final se caracteriza por un contenido en sales de 20 partes por millón (ppm), extremadamente bajo en comparación con las 600 ppm del agua importada por la ciudad.

El pasado abril, Trussell y su equipo ampliaron el proceso para conseguir un efluente aún más claro y limpio. El agua depurada se trata con ozono, lo que eleva la cantidad de microbios eliminados hasta el 99,9999 por ciento. A continuación, se hace circular a través de una serie de filtros especiales con el objetivo de reducir aún más cualquier contenido orgánico. Si tiene éxito, esta simple ampliación bastaría para convencer a los legisladores de que no es necesario descargar el agua tratada en un embalse. «Nunca podremos asegurar que eliminamos todos los patógenos», señala Trussell. Pero la calidad supera con creces todos los parámetros estatales y federales exigidos para el agua potable; en realidad, la depuración que se lograba antes de añadir este último paso ya igualaba o superaba los límites mínimos.

VENTAJA PSICOLÓGICA

Sin embargo, los hechos por sí solos no se ganan a la gente. Los defensores de la reutilización directa han de vencer la resistencia psicológica. La reutilización indirecta podría hallar menos trabas, en parte porque almacenar el agua en un embalse o acuífero da la idea de una importante separación entre el agua residual como fuente y la potable como producto.

Varias comunidades que han implantado con éxito procesos de reutilización indirecta sirven como ejemplo de la aceptación de este método. A finales de los noventa, el condado de Orange, a 145 kilómetros al norte de San Diego, hizo frente a un descenso en las reservas de agua, una escalada de los costes de importación y una población creciente. En 2008 contaba con la mayor instalación del mundo para recargar las aguas subterráneas con efluentes tratados aptos para consumo humano, al procesar 265.000 metros cúbicos de aguas residuales al día, el equivalente al 20 por ciento de la demanda local. Otros mu-

Continua en la página 66

Del inodoro al grifo

Las aguas residuales procedentes de los fregaderos, duchas e inodoros de edificios residenciales y comerciales pueden constituir un valioso recurso, en vez de un producto de desecho. Por lo general, estas se conducen a una estación depuradora donde se descontaminan antes de verterse a un río o al océano (*flecha azul oscuro*). En su lugar, los efluentes podrían depurarse hasta alcanzar los parámetros de calidad exigidos para el agua potable y descargarse en un embalse cercano o acuífero, o distribuirse a los grifos de hogares y negocios (*trayectorias en azul claro*).

Primera parada

Una depuradora municipal elimina de las aguas residuales la mayor parte de los sólidos, productos químicos y organismos biológicos. El proceso origina lodos como subproducto y agua reciclada. Esta puede verterse en medios naturales o destinarse a riego o a uso industrial sin causar perjuicio; otra opción consiste en conducirla a una estación de depuración avanzada (*derecha*).

Estación depuradora de aguas residuales

Río

Estación potabilizadora

Directa al grifo

Reconsiderar el suministro

La mayoría de las ciudades obtienen el agua potable de un río, acuífero o embalse. En una planta de tratamiento, suele someterse a un proceso que consta de filtración, desalinización y desinfección con cloro. Sin embargo, a medida que las reservas hídricas se agotan, las aguas residuales tratadas podrían recargar o reemplazar las fuentes tradicionales.

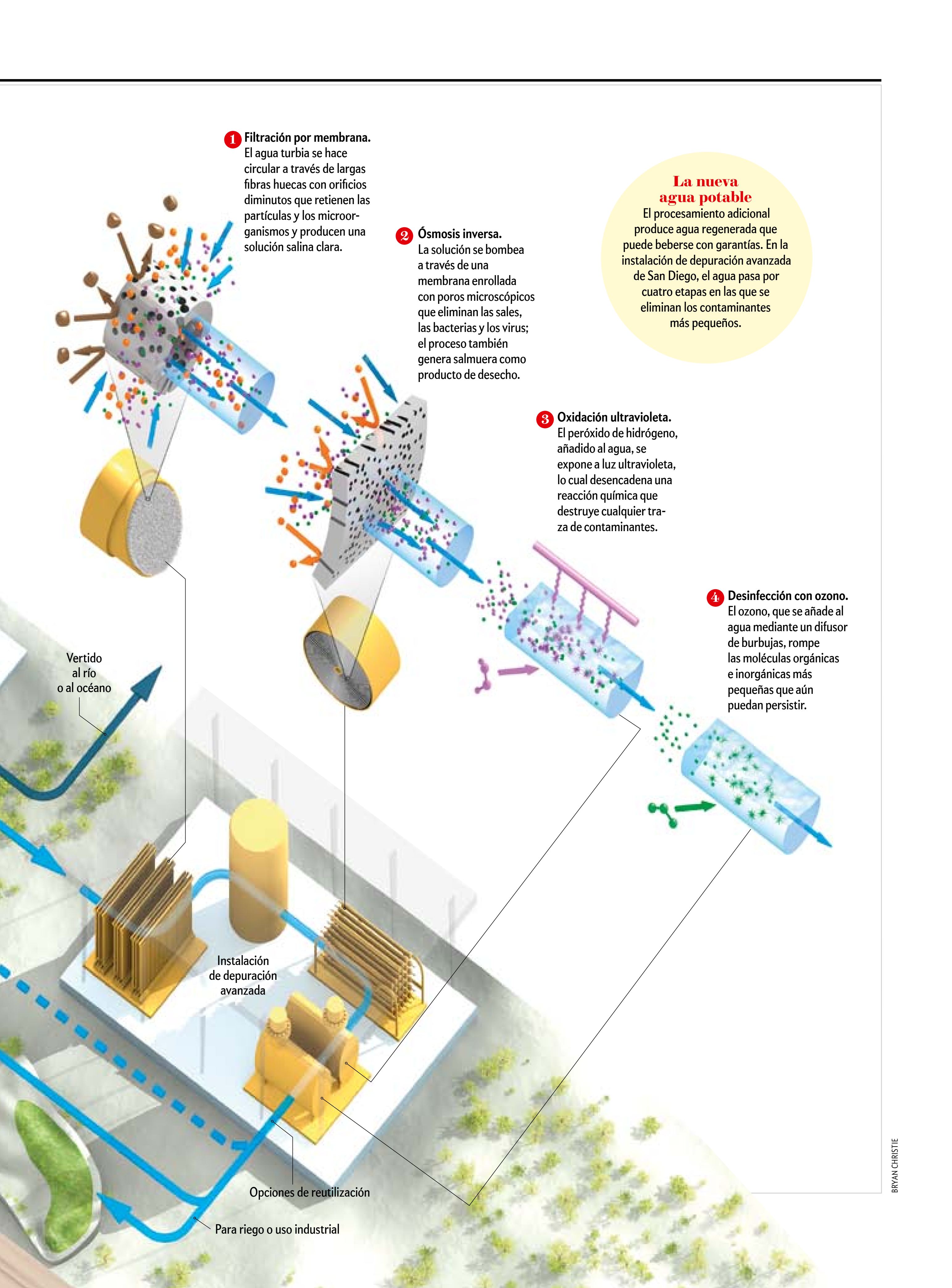
Embalse

Reutilización indirecta en un embalse

Acuífero

¿Al grifo o al suelo?

El agua regenerada puede abastecer directamente los hogares, pero hasta ahora las leyes solo permiten su descarga en un embalse o acuífero; la mezcla pasa por la estación potabilizadora de la localidad, donde se somete al tratamiento habitual.



1 Filtración por membrana. El agua turbia se hace circular a través de largas fibras huecas con orificios diminutos que retienen las partículas y los microorganismos y producen una solución salina clara.
2 Ósmosis inversa. La solución se bombea a través de una membrana enrollada con poros microscópicos que eliminan las sales, las bacterias y los virus; el proceso también genera salmuera como producto de desecho.
La nueva agua potable
El procesamiento adicional produce agua regenerada que puede beberse con garantías. En la instalación de depuración avanzada de San Diego, el agua pasa por cuatro etapas en las que se eliminan los contaminantes más pequeños.
3 Oxidación ultravioleta. El peróxido de hidrógeno, añadido al agua, se expone a luz ultravioleta, lo cual desencadena una reacción química que destruye cualquier traza de contaminantes.
4 Desinfección con ozono. El ozono, que se añade al agua mediante un difusor de burbujas, rompe las moléculas orgánicas e inorgánicas más pequeñas que aún puedan persistir.
Vertido al río o al océano
Instalación de depuración avanzada
Opciones de reutilización
Para riego o uso industrial
BRYAN CHRISTIE

Viene de la página 63
nicipios de California beben también agua cuyo suministro se complementa con efluentes tratados, pero en menor medida. En San José se ha previsto poner pronto en marcha una planta de depuración avanzada. Con una inversión de 60 millones de dólares, se ha diseñado para abastecer a Silicon Valley con 30.000 metros cúbicos de aguas negras tratadas. El producto resultante es lo bastante limpio para beber, pero por ahora solo se destinará al riego de granjas y campos de golf y a uso industrial.

Los residentes del condado de Orange, igual que había sucedido en San Diego, se mostraban escépticos al principio; un 70 por ciento se oponía al plan. Sin embargo, cuando la planta entró en funcionamiento, tuvo el apoyo de la comunidad entera gracias a una estrategia de relaciones públicas muy efectiva. Ron Wildermuth, responsable de la campaña, explica que los miembros del distrito de aguas del condado recogieron datos sobre la calidad del agua durante siete años antes de dirigirse a la población. Después dedicaron otros diez años a hablar con todos los sectores, desde centros de jardinería hasta negocios locales, para exponer las opciones e invitar a probar el agua.

Mediante la conversión de agua residual en potable, se crearía un suministro local fiable, se reducirían los vertidos al mar y se evitaría el elevado coste de renovar las depuradoras

La campaña allanó el camino para lo que está ocurriendo ahora en San Diego. «Sin ella, ni siquiera estaríamos hablando del método directo», comenta Steirer. San Diego, que ha adaptado la tecnología del condado de Orange, se inclina por el método directo, en parte porque no dispone de cuencas acuíferas subterráneas para almacenar el agua depurada. Muchos otros municipios del mundo se hallan en una situación similar, por lo que San Diego se ha convertido en el banco de pruebas.

Las experiencias en Australia ponen de manifiesto lo que no debe hacerse para influir en la opinión pública. El progreso ha sido «decepcionante», apunta Stuart Khan, experto en gestión de recursos hídricos de la Universidad de Nueva Gales del Sur en Sídney. Algunas provincias han prohibido el consumo de cualquier tipo de agua regenerada, y los métodos de reutilización en ciudades como Brisbane y Melbourne —que sufren esporádicas sequías de larga duración— se han hundido bajo el peso de la oposición pública. Khan cree que el error cometido por el Gobierno radicó en que se presionó a la sociedad para que lo aprobara en el momento equivocado. «Hemos aprendido que resulta insensato esperar hasta llegar a una situación desesperada», se lamenta, refiriéndose a que la gente se vio forzada a aceptar algo con lo que no se sentía cómoda.

Khan aboga por iniciar las conversaciones antes y añade que ahora podría ser el momento oportuno para intentarlo de nuevo en Australia, porque las reservas de agua han repuntado y se dispone de algún tiempo para discutirlo con la población. Ya existe una instalación que está lista para la conversión. El Proyecto de Agua Regenerada del Corredor Occidental, encargado en 2006 en el punto álgido de un período de sequía, con una inversión de 2300 millones de dólares, es un sistema que se desarrolló para reciclar el agua y destinarla a uso industrial, agrícola y potable. El plan consistía en descargar el agua depurada en la presa Wivenhoe, la mayor reserva hídrica de la que se abastecen Brisbane y sus alrededores. El sistema recolecta efluentes de seis depuradoras y los conduce a tres plantas de tratamiento avanzado.

Sin embargo, entre 2008 y 2010, cuando el sistema entró en funcionamiento, terminó la sequía y los planes para su uso potable se archivaron hasta que las reservas cayeran por debajo del 40 por ciento de capacidad. El agua regenerada ahora solo se emplea en procesos industriales. Khan y muchos otros expertos defienden que una de las plantas de tratamiento avanzado debería reconvertirse en una instalación de reutilización directa, con lo que se satisfaría alrededor del 35 por ciento de la demanda.

Si el Gobierno de Queensland opta por ese plan, crearía la mayor instalación de reutilización directa para uso potable del hemisferio sur. Puede que esta vez sea más fácil convencer a los políticos y a la sociedad, pero necesitarán información, además de tiempo, para considerar las opciones.

Los dirigentes podrían inspirarse en el trabajo publicado el año pasado por la Fundación de Investigación WateReuse, con sede en Estados Unidos. En uno de sus estudios, los investigadores de la fundación presentaron a cuatro grupos de californianos y australianos de distinto sexo, edad y educación cuatro situaciones posibles de obtención de agua doméstica. La primera representaba la práctica actual, en la que el agua potable se capta de un río donde también se vierten efluentes de depuradoras. En la segunda situación, el agua residual depurada se descontaminaba de nuevo y a continuación se diluía en un embalse para después someterla a un tratamiento de potabilización. En el tercer caso, el agua regenerada más pura se descargaba en un río, donde se dispersaba antes de ser tratada. En la última opción, la reutilización directa, el agua regenerada más pura se distribuía a los hogares de las ciudades sin pasar por el embalse ni la potabilizadora. Los participantes, con independencia del sexo o nivel de educación, consideraron que la opción más segura era la reutilización directa, y la que menos, la práctica actual.

CEDER ANTE LA NECESIDAD

Otra manera de cambiar la opinión de la sociedad consiste en demostrar que no se dispone de otras fuentes de agua. Tal estrategia tuvo éxito en Namibia, el único lugar del mundo que suministra, a una escala importante, agua regenerada de manera directa. En 1957, una grave sequía agotó las reservas de los acuíferos de la ciudad de Windhoek en tan solo ocho semanas. Ubicada a unos 300 kilómetros tierra adentro y a 800 kilómetros del río perenne más cercano, la comunidad se quedó sin fuentes fiables de agua. En 1968, la ciudad ya contaba con una instalación de reutilización directa totalmente operativa. Hoy en día, el 25 por ciento del agua doméstica de Windhoek proviene del procesamiento de aguas negras.

Windhoek se enfrentó a menos desafíos sociales que San Diego. Para empezar, en aquel entonces no había movimientos activistas, explica Petrus du Pisani, que supervisa la instalación. «Es posible que los ciudadanos se mostraran un tanto recelosos, pero aceptaron que era una decisión necesaria.» Apunta que, a finales de los años sesenta, «la gente tenía mucha fe en la

Aprovechamiento de aguas residuales en España

En nuestro país, donde esta práctica se halla extendida, las aguas regeneradas se destinan sobre todo a la agricultura

JOAN GARCÍA

«Sube un 73 por ciento el consumo de agua reutilizada en Alicante para paliar la sequía.» Este era uno de titulares de un periódico digital del Levante español del día 16 de junio de 2014. Con él queda patente que el aprovechamiento de aguas residuales se está convirtiendo en algo más que una herramienta importante en la gestión de los recursos hídricos en muchas localidades de nuestro país, donde hoy ya es una necesidad. De hecho, la experiencia española representa, a escala mundial, un referente en materia de reutilización.

Aunque muy variable entre regiones, alrededor del 10 por ciento de todas las aguas urbanas depuradas se reutiliza, una proporción no muy alejada de la de otras zonas con una larga tradición en esta práctica, como California. De este modo, en España se reutilizan de forma planificada entre 350 y 450 hectómetros cúbicos al año. Las comunidades de Valencia y Murcia se sitúan a la cabecera, con más de un 50 por ciento del total del caudal reutilizado, mayoritariamente para uso agrícola. En islas como Gran Canaria, un 20 por ciento de las aguas usadas en agricultura han sido regeneradas.

Pero los ejemplos no se limitan al sector agrario; la industria también está realizando una apuesta remarcable. Cabe mencionar el caso de una papelera de Madrid que usa unos 12.000 metros cúbicos al día de aguas regeneradas. Asimismo, el proyecto del Polo Químico de Tarragona prevé, en un futuro cercano, abastecer a la propia industria química con más de 85.000 metros cúbicos al día procedentes de las depuradoras de Tarragona y de Salou. Ello reducirá el volumen de agua potable que hoy consume la industria.

En 2007, la aprobación por el Gobierno de un reglamento de reutilización de las aguas depuradas constituyó un hito en la gestión de nuestros recursos hídricos. Dotarse de una normativa de estas características supuso reconocer la importancia presente y futura de esta práctica, y nos lanzó como referente internacional. De hecho, la Unión Europea no dispone de una normativa de aplicación común en los países miembros.

El reglamento de 2007 establece el procedimiento administrativo para la concesión, la autorización y los criterios de calidad del agua, especialmente los sanitarios, según su uso. En los proyectos de reutilización, la protección de la salud pública es prioritaria. En este sentido, el reglamento aplica el principio de precaución y prohíbe explícitamente el uso de las aguas regeneradas para el consumo humano directo. Pero no impide la reutilización indirecta de las aguas depuradas diluidas con aguas de un embalse o río que, sometidas a un tratamiento adecuado, pueden distribuirse para el consumo de la población. De hecho, esta es una práctica muy habitual en nuestro país.



AYUNTAMIENTO DE GRANOLLERS

El agua regenerada puede destinarse también a la restauración de ciertos entornos. Aquí se ha utilizado para recrear un humedal artificial en el Parque de Can Cabanyes, Granollers.

Distintos requisitos, distintos tratamientos

La calidad exigida para las aguas regeneradas depende del uso que se les dé. Si se destinan al riego de cultivos que se consumen crudos (como muchas hortalizas), tendrán unos requisitos más estrictos, especialmente los microbiológicos, que si se destinan a cultivos que se procesarán en la industria agroalimentaria (como las patatas chips).

La calidad que debe alcanzar el agua para reutilizar determina el tipo de tratamiento pertinente. Generalmente, la planta de regeneración se construye dentro del recinto de la estación depuradora de la que se van a aprovechar las aguas. La planta incluye procesos de tipo físico y químico muy similares a los empleados en las plantas potabilizadoras de agua. Los tratamientos avanzados de membranas solo resultan necesarios cuando se requiere desmineralizar el agua o cuando se plantean usos muy restrictivos, como el consumo directo mencionado en el artículo de Heffernan. En comparación con los procesos de regeneración clásicos, este tipo de tratamientos operan a altas presiones, demandan mucha energía y generan salmueras. Por todo ello, lo usual es eludirlos, ya que además suponen un coste de varias decenas de céntimos de euro por metro cúbico tratado, frente a los pocos céntimos de los sistemas de regeneración habituales.

Hoy en día, el conocimiento científico y la disponibilidad tecnológica no representan un obstáculo en el tratamiento y distribución de aguas regeneradas. Suelen ser los aspectos económicos y sociales los que impiden la aplicación de proyectos de reutilización. Por un lado, el coste de procesar y distribuir el agua potable procedente de pozos, manantiales o ríos suele ser inferior al del agua regenerada. Por otro, nuestra sociedad carece de la información suficiente para evitar la desconfianza que despierta el consumo de aguas regeneradas.

Puede decirse que la reutilización de aguas residuales en nuestro país se halla en un estado operativo; no obstante, conviene acrecentar el nivel de conocimiento, de manera que la práctica gane una mayor aceptación y pueda impulsarse todavía más. En concreto, debe estudiarse en profundidad la reutilización en las actividades industriales y la restauración ambiental, así como la recuperación de energía a partir de las aguas regeneradas, y debe determinarse la presencia en ellas de microcontaminantes y el riesgo toxicológico que puede conllevar su uso.

Joan García *es catedrático de tecnologías del medio ambiente y director del Grupo de Ingeniería y Microbiología del Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Cataluña.*

ciencia y en los círculos oficiales». Aun así, la ciudad informó a la población y la invitó a probar el agua. «Ahora, para nosotros, beber agua reciclada es un práctica aceptada.»

Sin embargo, el sistema implantado en Namibia nunca se exportaría hoy a otros lugares. Aunque emplea múltiples etapas de tratamiento, no incluye ósmosis inversa, que resulta clave en el proyecto de San Diego y en otros como el del condado de Orange. Los dirigentes de Namibia afirman que el agua es segura y cumple los criterios establecidos por la OMS.

Windhoek, localizada tierra adentro, tendría dificultades para deshacerse del gran volumen de salmuera que genera la ósmosis inversa. Y, en los años sesenta, las aguas residuales contenían menos compuestos sintéticos, indica Du Pisani. «Nuestra principal preocupación eran los jabones y los agentes espumantes.» La desventaja de omitir este paso supone obtener agua potable rica en sólidos disueltos que le confieren un sabor salado.

Du Pisani prevé que hacia 2020 Windhoek incorpore un proceso de ósmosis inversa a pequeña escala para reducir la salinidad. Añade que los parámetros de calidad del agua potable están cambiando con rapidez en todo el mundo, incluso en Namibia, y apunta que el método de Windhoek ya no resulta el más apropiado. El volumen de sales, además de la gran cantidad de energía que requiere el proceso de ósmosis inversa, podría hacer la reutilización directa demasiado costosa para otras comunidades. Irónicamente, se están desarrollando nuevos tratamientos para reducir la cantidad de salmuera y, en general, de los productos de desecho generados en el conjunto del proceso. La reutilización indirecta y la desalinización también emplean ósmosis inversa. Por tanto, la alternativa directa a menudo consume menos energía que otras opciones porque estas requieren tuberías y estaciones de bombeo adicionales.

Conforme la sequía ha empezado a afectar a Estados Unidos, varias localidades se han visto obligadas a afrontar un destino similar al de Windhoek. Big Spring, en Texas, ha visto cómo se reducían las precipitaciones año tras año. Cloudcroft, en Nuevo México, una pequeña comunidad montañera cuya población se duplica durante los fines de semana y los períodos vacacionales, traía agua desde distancias considerables. El año pasado, ambas localidades empezaron a regenerar sus efluentes para complementar sus necesidades de agua potable. Ninguna de ellas cuenta con acuíferos o embalses adecuados para almacenar a largo plazo las aguas tratadas. En Cloudcroft, las aguas residuales depuradas se mezclan con agua extraída de pozos o manantiales y se almacenan temporalmente en un depósito antes de someterse a un nuevo tratamiento y distribuirse a los hogares. En Big Spring, el agua residual limpia se diluye en un embalse de la región y la dilución se trata. Estos métodos eluden cualquier clasificación; algunos los definen como reutilización directa, y otros, como indirecta.

EL SABOR DEL ÉXITO

San Diego no se halla todavía en una situación tan desesperada, lo que lleva a algunos expertos a declarar que la ciudad debería plantearse soluciones alternativas. Pese a defender el método, Peter Gleick, autoridad en hidrología y presidente del Instituto del Pacífico, piensa que aún faltan décadas para implantar la reutilización directa. «No existe una sensación de urgencia para usar agua regenerada», dice Gleick. Alega que California debería centrarse en la conservación del agua; no solo en las ciudades, sino, sobre todo, en las operaciones agrícolas, que consumen el 80 por ciento del suministro. No obstante, Baehrens cree que los habitantes de San Diego ya hacen un uso responsable del agua: «No nos quedamos en la ducha mucho tiempo y solo regamos las plantas en las horas más frescas de la mañana y de la tarde.» Parte del problema del ahorro del agua radica en que suele ser una práctica voluntaria y, por tanto, resulta difícil depender de ella para desarrollar una planificación.

Sería prudente estar preparado con los métodos avanzados. Singapur abrió su primera instalación NEWater en el año 2000. Ahora cuenta con cuatro plantas que han adquirido fama por producir el efluente más puro del planeta. Menos del 5 por ciento de esta agua se utiliza para beber, y primero se diluye en embalses de la región. El resto se destina a uso industrial. Sin embargo, en caso de que se deteriorasen las relaciones con Malasia, de donde procede el 40 por ciento del agua, Singapur podría aumentar el suministro de NEWater a los grifos de la ciudad.

Puede que a algunas comunidades les preocupe el elevado coste de purificar las aguas residuales. Los estudios en San Diego indican que la reutilización indirecta en una instalación que procesara 50.000 metros cúbicos al día costaría alrededor de 1,6 dólares por metro cúbico de agua limpia producida, aproximadamente el mismo precio del agua que la ciudad importa ahora. Los estudios sobre plantas de procesamiento para uso directo que operan con depuración avanzada calculan un coste inferior a un dólar por metro cúbico. Los operarios de la planta de desalinización de Poseidon que se está construyendo cerca de Carlsbad, en California, estiman un coste de entre 1,5 y 1,7 dólares por metro cúbico, aunque cálculos independientes indican que la desalinización en ese estado podría superar los 2,5 dólares.

Con independencia del método de reutilización, si se diera luz verde a la planta de depuración avanzada, supondría un triunfo para San Diego porque crearía un suministro fiable de agua, se reducirían los vertidos al mar y se ahorrarían los miles de millones de dólares necesarios para modernizar las depuradoras. Hasta entonces, el agua limpia (aunque no potabilizada) continuará fluyendo por las tuberías moradas a la vera de las carreteras que conducen a las industrias. Las tuberías están claramente marcadas con etiquetas que advierten «No beber».

La ciudad tiene la oportunidad de liderar en el mundo un cambio de opinión sobre cómo vemos —y utilizamos— las aguas residuales. «El agua es un recurso recuperable, no una fuente de residuos», declara Tchobanoglous. Una vez se comprenda este concepto, los municipios actuarán como empresarios privados y procurarán recuperarla. Podría transcurrir una década hasta que California establezca leyes que permitan la reutilización directa y San Diego pueda enviar un producto de máxima calidad al grifo. «Nos gustaría beber el agua y que la gente la probara», comenta Steirer, que está deseando poder tomar por fin un trago.

PARA SABER MÁS

Saving the Ogallala aquifer. Jane Braxton Little en *Scientific American*, marzo de 2009.

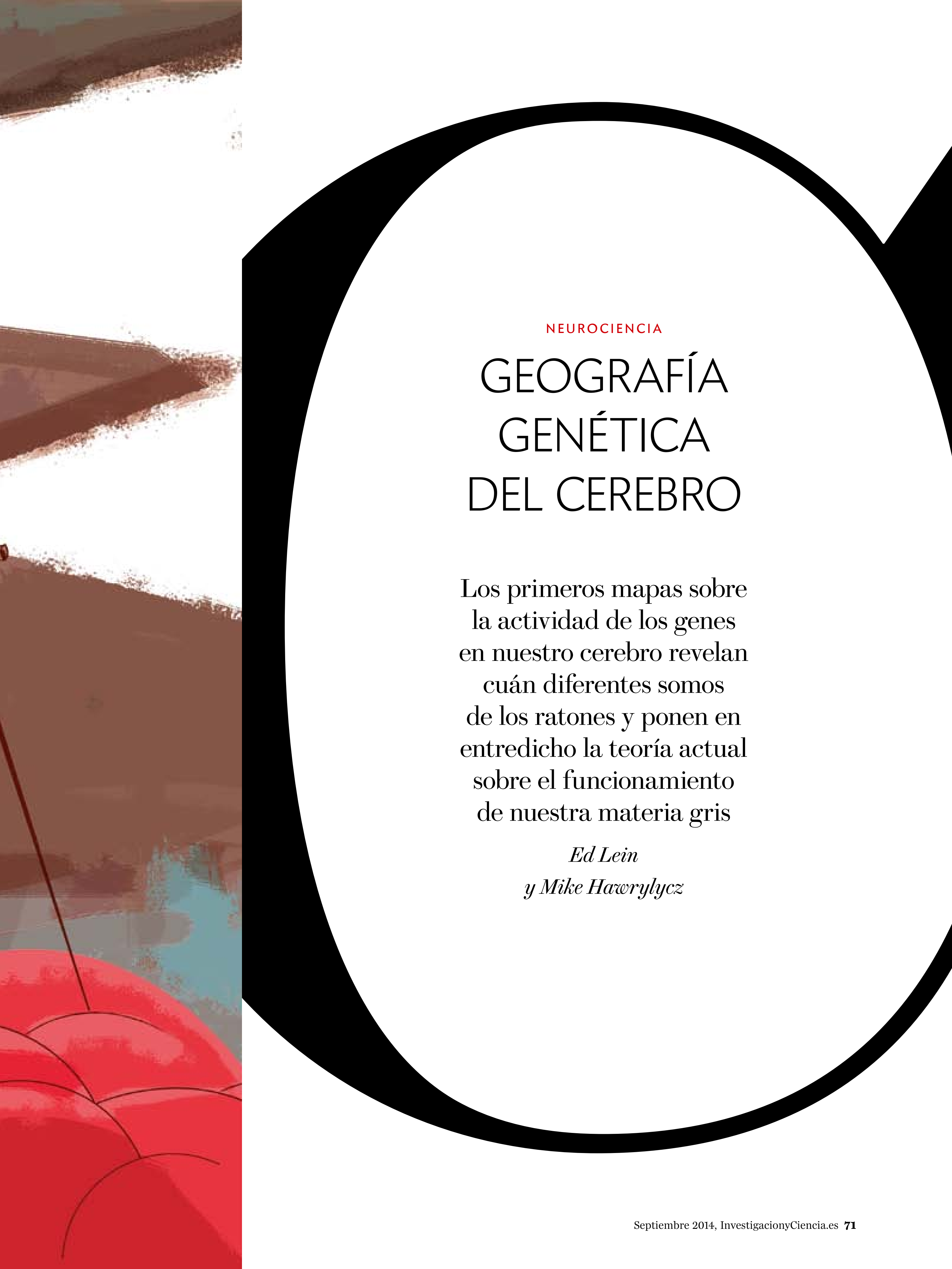
Direct potable reuse: A path forward. George Tchobanoglous et al. WateReuse Research Foundation and WateReuse California, 2011. **aim.prepared-fp7.eu/viewer/doc.aspx?id=39**

Water reuse: Potential for expanding the nation's water supply through reuse of municipal wastewater. National Research Council et al. National Academies Press, 2012. **www.nap.edu/catalog.php?record_id=13303**

Potable reuse: Developing a new source of water for San Diego. Marsi A. Steirer y Danielle Thorsen en *Journal-American Water Works Association*, vol. 105, n.º 9, págs. 64-69, septiembre de 2013.

Advanced Water Purification Facility: **www.sandiego.gov/water/waterreuse/demo**





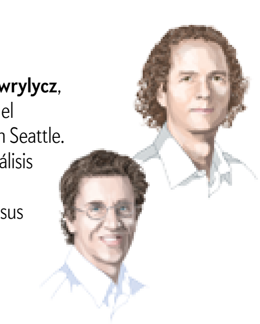
NEUROCIENCIA

GEOGRAFÍA GENÉTICA DEL CEREBRO

Los primeros mapas sobre la actividad de los genes en nuestro cerebro revelan cuán diferentes somos de los ratones y ponen en entredicho la teoría actual sobre el funcionamiento de nuestra materia gris

Ed Lein y Mike Hawrylycz

Ed Lein, neurobiólogo, y **Mike Hawrylycz**, matemático aplicado, trabajan en el Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle. Juntos han liderado el diseño y análisis de los proyectos para los atlas del cerebro del ratón, del macaco rhesus y del ser humano.



A MEDIDA QUE LEEMOS, NUESTROS OJOS RECORREN ESTA PÁGINA EN BÚSqueda de pautas que nuestra mente dota de significado. Mientras tanto, el corazón se contrae y dilata, el diafragma sube y baja para regular la respiración, los músculos de la espalda se tensan para mantener la postura, y miles de otras tareas básicas de la vida consciente y subconsciente siguen su curso, todas bajo el control coordinado de unos 86.000 millones de neuronas y otras tantas células de soporte presentes en nuestro cerebro. Para los neurocientíficos, incluso el sencillo acto de leer una revista constituye una hazaña prodigiosa, tal vez uno de los enigmas más difíciles de resolver. En verdad, no podemos explicar cómo piensa el cerebro humano ni por qué un mono no puede razonar como lo hacemos nosotros.

A pesar de haber estudiado en profundidad el cerebro humano durante más de un siglo, los neurocientíficos todavía nos sentimos como exploradores que acabasen de alcanzar las costas de un continente recién descubierto. Los primeros que lo hicieron trazaron las fronteras y contornos más generales. A inicios del siglo XX, el científico alemán Korbinian Brodmann obtuvo cortes de cerebros humanos y los colocó bajo su microscopio para examinar la corteza cerebral, las capas externas de materia gris que controlan la mayor parte de la percepción, el pensamiento y la memoria. Dividió la corteza en varias docenas de regiones, según la topología del órgano y el aspecto que adquirían las células en cada una de ellas cuando se teñían con diferentes colorantes.

Poco a poco se fue viendo que cada región, cada conjunto de células, se encargaba de una serie concreta de funciones. Algunos pusieron en duda que una función estuviera restringida a una localización. Pero el modelo de parcelación se ha puesto de nuevo de moda con la aparición de nuevas herramientas, especialmente la resonancia magnética funcional (RMf), que registra las partes del cerebro que se «iluminan» (consumen oxígeno) cuando leemos, soñamos o incluso mentimos. Esta técnica se ha empleado para construir mapas que relacionan los datos de la RMf con el comportamiento humano.

Una nueva escuela de pensamiento, sin embargo, postula que el cerebro es más parecido a una red social informal que a una red con una división rígida del trabajo. Según esta visión, las conexiones de una neurona con otras, más que su ubicación, determinan su funcionamiento; y el que presenta cualquier región está muy influenciado por la experiencia pasada y la situación actual. De ser cierta esta idea, se esperaría observar actividad superpuesta entre las regiones cerebrales que controlan distintas tareas. Comprobar esta hipótesis entraña dificultad, ya que los circuitos nerviosos son difíciles de trazar y los miles de millones de neuronas humanas presentan tal vez 100 billones de conexiones, o sinapsis. Pero varios proyectos en marcha están desarrollando nuevas técnicas para llevar a cabo este trabajo.

En 2003, cuando el Proyecto Genoma Humano publicó la secuencia de nuestro ADN, nuestro grupo y colaboradores del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle, decidimos aprovecharnos de este catálogo de alrededor de 20.000 genes y de los sistemas de análisis genético para examinar el cerebro desde una nueva perspectiva. Nos dimos cuenta de que, si combi-

EN SÍNTESIS

Tras un descomunal esfuerzo, se ha logrado crear un «atlas» genético de nuestro cerebro. Para ello se ha cartografiado la actividad de todos los genes de seis cerebros humanos adultos.

El nuevo mapa revela profundas diferencias neurobiológicas entre los ratones y los humanos, lo que cuestiona el amplio uso de estos animales como modelo experimental de personas.

El atlas, junto con otros proyectos actuales para cartografiar en detalle la estructura del cerebro, servirá como punto de referencia en la búsqueda de las causas y curas de las enfermedades neurológicas.

PÁGINA ANTERIOR: SCOTTY REIFSNYDER

Megaproyectos en marcha

En EE.UU. y Europa se están llevando a cabo varios proyectos plurianuales bien financiados para desentrañar la sobrecogedora complejidad del cerebro. Algunos están localizando las conexiones neurales. Otros están construyendo modelos tridimensionales de alta resolución del cerebro humano o cartografiando la expresión (o actividad) genética del cerebro de otros animales.

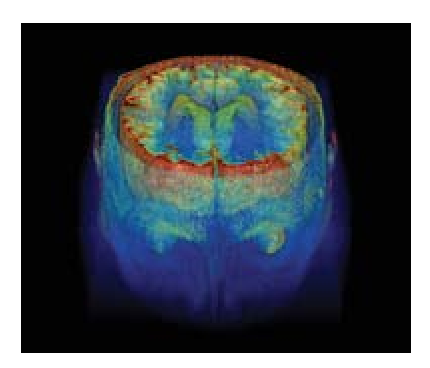


↑ **SyNAPSE** es un programa de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa cuyo objetivo consiste en crear cerebros digitales mediante el uso de chips neurosinápticos que incluyen 10.000 millones de neuronas electrónicas conectadas por 100 billones de sinapsis. En 2012, un grupo de IBM informó que, en un superordenador del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, había simulado medio segundo de actividad de 530.000 millones de neuronas simplificadas conectadas por casi 137 billones de sinapsis. **http://research.ibm.com/cognitivecomputing/neurosynaptic-chips.shtml**

El proyecto **Atlas de la Conectividad del Cerebro de Ratón,** del Instituto Allen de Neurociencia, en Seattle, infecta neuronas con virus que producen proteínas fluorescentes al llegar a ellas. Los brillantes virus permiten localizar las largas ramificaciones de las neuronas, que se conectan en complejos y extensos circuitos. **http://connectivity.brain-map.org**

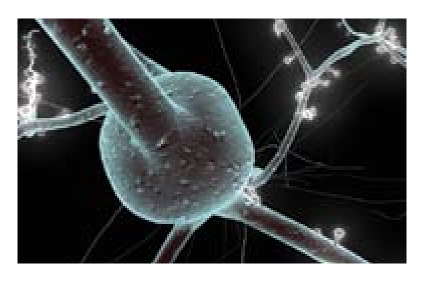
El proyecto **Atlas del Cerebro de Primates no Humanos** cartografía la expresión de genes en el cerebro de macacos rhesus durante su desarrollo, desde etapas prenatales hasta que alcanzan los cuatro años de edad. El proyecto, financiado por los Institutos Nacionales de la Salud (NIH, por sus siglas en inglés) de EE.UU., se desarrolla en el Instituto Allen. **http://blueprintnhpatlas.org**

El proyecto **BigBrain,** una colaboración entre científicos de Alemania y Canadá, ha dado lugar a un modelo tridimensional de un cerebro humano de una mujer de 65 años con una resolución de 20 micras, casi suficiente para detectar células individuales. **https://bigbrain.loris.ca**



↑ El **Proyecto Conectoma Humano,** iniciado en 2010 por los NIH y un consorcio de universidades, está obteniendo imágenes detalladas, secuencias genéticas y perfiles de comportamiento del cerebro de 1200 adultos sanos (con cientos de pares de gemelos y sus hermanos no gemelos) para crear una base de datos de referencia. **https://humanconnectome.org**

EyeWire, desarrollado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, permite a cualquier persona contribuir al trabajo de cartografiar las trayectorias de las neuronas. **http://eyewire.org**



↑ El **Proyecto Blue Brain,** un esfuerzo conjunto de IBM Research y el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana que comenzó en 2005, ha usado un superordenador para construir un cerebro virtual en un programa informático. El proyecto ha simulado una columna de la corteza cerebral de una rata, del tamaño de la cabeza de un alfiler, con cerca de 10.000 neuronas distribuidas en capas. **http://bluebrain.epfl.ch**



↑ El **Proyecto Cerebro Humano,** continuación del Proyecto Blue Brain, fue iniciado en octubre de 2013 por la Unión Europea. Está previsto que dure diez años, cuenta con un presupuesto de 1190 millones de euros y pretende crear un «CERN de la neurociencia», con una capacidad de computación equiparable a la del centro de física de partículas que alberga el Gran Colisionador de Hadrones. **http://humanbrainproject.eu**

nábamos las herramientas genéticas con las de neurociencia clásicas, podríamos adentrarnos en el continente inexplorado. De hecho, podríamos cartografiar las partes del genoma que se hallaban activas, y las que no, en todo el volumen del cerebro. De este modo, esperábamos que el mapa revelara un conjunto de genes distinto en la parte del cerebro responsable de la audición respecto al de las regiones del tacto, el movimiento o el razonamiento.

Nuestro objetivo, que hemos logrado después de casi una década, consistía en crear atlas tridimensionales que indicaran dónde operaban los genes en los cerebros de personas sanas y, por comparación, en ratones. Estos mapas moleculares aportan datos básicos muy valiosos sobre el cerebro, de la misma manera en que lo hizo la secuencia de ADN descrita por el Proyecto Genoma Humano. Confiamos en que tal avance acelere el progreso de la neurociencia y el descubrimiento de fármacos, a la vez que permita profundizar en el conocimiento de la estructura del cerebro.

Los mapas obtenidos en humanos y ratones ya han dado algunas sorpresas. Una importante es que, aunque cada persona es única, los patrones de actividad de los genes se asemejan mucho de un cerebro a otro. A pesar de nuestras diferencias, los humanos compartimos una geografía genética común en nuestros cerebros. Lo que es más, en un mismo individuo no hallamos grandes variaciones entre las acciones de los genes del hemisferio izquierdo y el derecho. Y aunque los ratones se usan en la mayor parte de la investigación en neurociencia y en ensayos clínicos tempranos, nuestros resultados revelan que, por lo que respecta a los genes, los humanos no somos equipa-

Continúa en la página 76

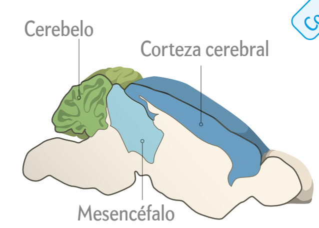
CORTESÍA DE IBM RESEARCH (*SyNAPSE*); CORTESÍA DE ZACH WISE Y *NEW YORK TIMES* (*Proyecto Conectoma Humano*); CORTESÍA DE EPFL Y PROYECTO BLUE BRAIN (*Proyecto Blue Brain y Proyecto Cerebro Humano*)

Actividad neural en ratones y humanos

El equipo de los autores ha descubierto que el patrón de la expresión (o actividad) de los genes en el cerebro de un ratón (*abajo*) difiere de forma notable del de un humano adulto (*página opuesta*), que es extraordinariamente uniforme en hombres y mujeres de distintas razas y edades. La cuadrícula muestra las discrepancias de actividad entre más de 100 localizaciones de cada cerebro. (Para más detalles, véase «Como leer esta gráfica» al pie de esta página.)

Geografía genética del cerebro de ratón

Casi el 90 por ciento de los genes que codifican proteínas en el ADN humano también aparecen de alguna manera en ratones. Pero cuando los autores examinaron en el cerebro de estos animales unos mil de estos genes comunes, descubrieron diferencias de actividad en casi una tercera parte de ellos. Una mirada rápida a esta gráfica revela una desigualdad notable entre ratones y humanos en el patrón de actividad general de los genes fuera de la corteza cerebral. Los primeros se estudian a menudo como modelos experimentales de humanos para pruebas clínicas e investigación en neurociencia; este hallazgo refuerza la idea de que esta práctica tal vez produzca resultados engañosos en algunos casos.



Cómo leer esta gráfica

Igual que una tabla de un mapa de carreteras, que ofrece un listado de los kilómetros entre pares de ciudades, esta gráfica muestra la «distancia genética» entre pares de localizaciones del cerebro, o de modo más preciso, el número de genes con una actividad genética (o cantidad de proteína sintetizada) claramente diferente entre un lugar y otro. Cada localización, como esta en el tálamo de ratón, aparece a la vez en las filas y en las columnas. (Aquí solo están etiquetadas las columnas que corresponden a los núcleos cerebelosos.) En cada punto de esta fila, el tamaño y el color representan la diferencia de actividad entre esta localización particular del tálamo y el sitio muestreado de la parte del cerebro correspondiente a la columna con la que se cruza. Los primeros puntos de la fila, por ejemplo, indican que hay pocos genes que se expresen de un modo muy diferente entre el tálamo de ratón y los núcleos cerebelosos.

Geografía genética del cerebro humano

El examen detallado de cerebros humanos reveló otra sorpresa. En toda la corteza (la parte del cerebro de evolución más reciente e implicada en funciones complejas, como leer, hablar y razonar), la actividad genética es extraordinariamente uniforme (*áreas lisas y de colores claros*). Lo mismo ocurre en el cerebelo, un centro de control motor. Pero la mayoría de las otras regiones muestran mucha más variación interna en los niveles de expresión genética. Entre ellas se hallan el hipocampo, el puente troncoencefálico y el bulbo raquídeo, unas estructuras que dirigen funciones más simples, como la respiración, el hambre o el sueño, y que los humanos compartimos con pájaros y otros vertebrados con los que estamos lejanamente emparentados.

FUENTE: MIKE HAWRYLYCZ; JAN WILLEM TULP (*gráfica*); JEN CHRISTIANSEN (*cerebros*)

Viene de la página 73
rables a los ratones. Este descubrimiento pone en cuestión el empleo de estos animales como un modelo para el estudio de la neurobiología de nuestra especie.

DE RATONES A HUMANOS

Nadie había elaborado antes un mapa genético completo del cerebro de un mamífero. Comenzamos con el de un ratón para poder lidiar con todos los detalles. Estos animales poseen tantos genes como los humanos, pero su cerebro es 3000 veces menor que el nuestro.

Durante tres años procesamos más de un millón de cortes de cerebro de ratón, empapándolos con marcadores que se unen a cualquier gen que se exprese, esto es, que se esté utilizando. En concreto, el ADN se copia en un fragmento corto de ARN llamado transcrito, un paso intermedio del producto final codificado por un gen, normalmente una proteína con una función concreta (como llevar a cabo una reacción enzimática o formar parte de la maquinaria celular). Pero algunos transcritos de ARN desempeñan tareas sin necesidad de ser traducidos en una proteína. Hemos identificado unos mil tipos de estos ARN no codificantes, además de todos los genes que codifican proteínas.

Aparte de perfeccionar nuestras técnicas, el proyecto sobre el ratón nos aportó uno de los primeros resultados inesperados. Como en el ser humano, casi cada célula de un ratón contiene un conjunto completo de cromosomas y, por consiguiente, al menos una copia de cada gen del genoma del animal. En las células adultas, una gran parte de estos genes se hallan inactivos (no están siendo copiados en ARN). Sin embargo, cuando completamos el atlas del ratón en 2006, comprobamos que muchos genes, más de cuatro de cada cinco, seguían funcionando en alguna parte del cerebro después de que el animal muriera. (Se sabe que los patrones de actividad genética suelen variar a una escala de horas y persisten durante varias horas después de la muerte.) Cuando nos planteamos crear el atlas del cerebro humano, nos preguntamos si exhibiría una actividad genética igualmente alta y, aún más importante, si los patrones específicos se parecerían a los observados en ratones.

En verano de 2009 recibimos el primer cerebro humano, uno de un hombre de raza negra de 24 años donado por la familia. Lo analizamos mediante RMf para obtener un modelo tridimensional del órgano inalterado y después lo congelamos, todo en las 23 horas posteriores a la muerte accidental (lo bastante rápido como para conservar los patrones de ARN normales). Aparte de padecer asma, el individuo estaba sano.

Para lidiar con un tamaño cerebral 3000 veces mayor que el del ratón, adoptamos otro método para medir la expresión de los genes. Obtuvimos cortes finos del cerebro congelado y los teñimos y fotografiamos con alta resolución. Después los anatomistas extrajeron con láser muestras microscópicas de las cerca de 900 estructuras que habíamos preseleccionado en determinadas zonas del cerebro. Los biólogos moleculares analizaron cada muestra mediante chips de ADN, unos dispositivos que miden de manera simultánea la cantidad de ARN correspondiente a cada gen que codifica proteínas en el genoma humano.

Tras estudiar así el primer cerebro, introdujimos todos los resultados en una base de datos informática. De este modo, podíamos seleccionar cualquier gen y determinar cuánto de su ARN estaba presente en cada una de las 900 estructuras muestreadas y, por tanto, su nivel de expresión en las horas antes de que el donante muriera. Mientras íbamos eligiendo un gen tras otro, vimos con emoción aparecer los diferentes patrones. Ahora podíamos empezar la verdadera exploración.

El origen más probable de las diferencias entre humanos y monos reside en la configuración de las conexiones entre neuronas, y no en la expresión de los genes de estas células

SOMBRAS DE MATERIA GRIS

Desde el principio, mientras analizábamos en detalle los datos del primer cerebro, descubrimos con sorpresa que los patrones de expresión del hemisferio izquierdo eran especulares, casi exactamente, a los del hemisferio derecho. La idea de que el lado izquierdo se especializa en determinadas funciones, tales como las matemáticas y el lenguaje, y que el derecho contribuye más al pensamiento artístico y creativo está aceptada en la cultura popular, pero no observamos ningún indicio de tales diferencias en la actividad de los genes. Confirmamos este hallazgo en el segundo cerebro que examinamos. Los resultados eran tan concluyentes que solo hemos estudiado uno de los hemisferios de cada uno de los cuatro cerebros que hemos procesado desde entonces; este descubrimiento adelantó la construcción del atlas al menos un año.

Igual que en los ratones, la gran mayoría de los genes (el 84 por cierto de los distintos tipos de transcritos de ARN que analizamos) estaban activos en alguna parte de los seis cerebros humanos. El órgano lleva a cabo una enorme variedad de tareas, y el mapa reveló que en cada una de las grandes regiones se movilizan diferentes conjuntos de genes, lo que contribuye a sus funciones particulares.

Entre los donantes estudiados había hombres y mujeres, jóvenes y ancianos, y negros, blancos e hispanos. Algunos poseían un cerebro grande y otros pequeño. A pesar de tales diferencias, los seis exhibieron una actividad genética altamente concordante. Más del 97 por ciento de las veces, cuando observábamos una gran cantidad de ARN de un gen en una parte de un cerebro, ocurría lo mismo en la mayoría de los demás.

Comenzamos examinando grupos de genes activos en diversas zonas del órgano. Comparamos los que más se expresaban en el mesencéfalo (una región primitiva que también presentan los reptiles) con los que más lo hacían en la corteza cerebral.

Los neurólogos saben desde hace tiempo que las células de las estructuras más primitivas, como el hipotálamo, el hipocampo y el puente troncoencefálico (responsables del control de la temperatura corporal, el hambre, la memoria espacial y el sueño) se agrupan en distintos núcleos que se comportan de un modo diferente los unos de los otros. Nuestro equipo descubrió que en muchos de esos núcleos se activaban conjuntos distintos de genes. En estas estructuras primitivas hay una cacofonía de voces genéticas clamando a la vez.

En cambio, la corteza cerebral muestra diferencias tanto en su estructura como en su actividad genética. Esta región está formada por una variedad de tipos celulares que se organizan en una lámina compuesta de seis capas de materia gris. De evolución reciente, se ha desarrollado de tal modo que resulta proporcionalmente más prominente en humanos que en otros animales; la materia gris es responsable de la complejidad única del comportamiento humano y la personalidad individual. Obviamente, nos preguntábamos si en esta región más avanzada, la complejidad de su función se asociaba a grandes diferencias en la expresión de los genes de una parte con respecto a los de otra. Al fin y al cabo, Brodmann había dividido la corteza en docenas de parcelas bien definidas, por lo que esperábamos que los distintos papeles que desempeñan cada una de ellas en el comportamiento humano se debieran al uso de diferentes grupos de genes.

Pero el atlas nos hizo descartar esa idea: la actividad genética de la corteza, para cualquier tipo celular, es notablemente homogénea en la materia gris, desde la frente hasta la parte posterior del cráneo.

Si bien observamos que cada tipo de célula cortical poseía unos rasgos genéticos singulares, aparecieron pocas fronteras claras en la geografía de la actividad genética (con la importante excepción de la corteza visual de la parte posterior del cráneo, que procesa los estímulos ópticos). El cerebelo, una estructura también de evolución reciente en los humanos que se ubica en la base del cerebro, es igualmente un mar de homogeneidad.

Estos resultados son difíciles de reconciliar con la idea inspirada por Brodmann de que la corteza se divide en parcelas claras dedicadas a tareas concretas cuya ejecución está controlada por los genes que albergan. Por el contrario, el atlas apoya otra hipótesis: los genes definen cada uno de los diferentes tipos celulares, así como la arquitectura básica de una pequeña columna cortical que organiza las células de diverso tipo de un modo predefinido, desde la superficie del cerebro hasta la base de la corteza. Pero la corteza como conjunto está formada por numerosas copias de esa columna canónica. Su funcionamiento parece depender mucho más del modo en que las neuronas están conectadas en los circuitos (y de la historia de los estímulos que llegan a ellos) que de los cambios en la actividad genética de un área de Brodmann a otra.

MÁS PARECIDOS A MONOS

Cuando comparamos los aproximadamente 1000 genes que se activan en la corteza de ratón y la humana, nos sorprendió que casi una tercera parte de ellos lo hicieran de un modo muy diferente. Algunos se expresan en una de las especies pero no en la otra, mientras que otros se usan a ritmos muy diferentes.

El grado de similitud entre el ratón y el humano es relevante porque muchos experimentos neurológicos y ensayos clínicos se llevan a cabo primero en ratones. Los roedores son baratos y de crianza rápida, fáciles de controlar y examinar. Sin embargo, los tratamientos eficaces en ellos rara vez lo son en los humanos. La variabilidad en la expresión génica entre las dos especies podría ayudar a explicar el porqué.

Por el contrario, los datos que hemos analizado hasta el momento en el macaco rhesus indican que menos del 5 por ciento de los genes que se activan en su cerebro lo hacen de un modo diferente al humano. Nuestro trabajo sobre el atlas cerebral de monos todavía está en curso, de manera que los números pueden cambiar conforme vayamos obteniendo más datos. No obstante, la observación de que la actividad genética en humanos y en monos es básicamente similar apunta de nuevo a que la fuente más probable de nuestras diferencias reside en la configuración de las conexiones entre neuronas, y no en la expresión de los genes de estas células. Además, se pone de manifiesto la necesidad de aportar información más detallada sobre el cerebro humano a los investigadores y las compañías farmacéuticas para ayudarles a distinguir las dianas terapéuticas que pueden ser modelizadas en ratón de aquellas que deben ser estudiadas en animales más parecidos a nosotros.

Desde que en 2007 presentamos el mapa del cerebro del ratón, los datos han sido aprovechados en más de mil estudios científicos. Los siguientes objetivos del atlas del cerebro humano, que en 2010 se hizo accesible al público para los dos primeros cerebros, son la mejora de la resolución y del alcance del mapa. Hemos aprendido que no podremos entender por completo el papel de la actividad de los genes en la función del cerebro hasta que midamos los patrones de expresión en neuronas individuales. Se trata de un verdadero reto en un órgano tan grande y complejo como el cerebro humano. Pero están apareciendo nuevas técnicas que permiten medir el ARN codificante en distintas neuronas. Con estas herramientas pueden determinarse también todos los ARN transcritos, lo que ayudaría a aclarar si los ARN que no producen proteínas (la llamada materia oscura del genoma) desempeña una tarea importante en el cerebro.

Para facilitar el uso del atlas a los científicos que investigan trastornos cerebrales, como el autismo, el alzhéimer o el párkinson, el Instituto Allen ha hecho accesibles todos nuestros datos, así como una interfaz fácil de usar llamada Brain Explorer. Esperamos que estas primeras tentativas de comprender la función del cerebro humano a través de su mapa genético allanen el camino para que otros logren avances inesperados.

PARA SABER MÁS

Transcriptional architecture of the primate neocortex. Amy Bernard et al. en *Neuron*, vol. 73, n.º 6, págs. 1083-1099, marzo de 2012.

An anatomically comprehensive atlas of the adult human brain transcriptome. Michael J. Hawrylycz et al. en *Nature*, vol. 489, págs. 391-399, septiembre de 2012.

La aplicación informática The Brain Explorer y los datos del Atlas del Cerebro del Instituto Allen están disponibles en línea en **human.brain-map.org/static/brainexplorer**

EN NUESTRO ARCHIVO

Una nueva cartografía del cerebro. Karl Zilles y Katrin Amunts en *MyC* n.º 46, 2011.

Atlas genético del cerebro. Allan R. Jones y Caroline C. Overly en *MyC* n.º 58, 2013.

El nuevo siglo del cerebro. Rafael Yuste y George M. Church en *IyC*, mayo de 2014.

FÍSICA TEÓRICA

«Tal vez estemos llegando al final de un ciclo»

Luis Álvarez-Gaumé, investigador del CERN, se pregunta en esta entrevista si algunos principios considerados clave en física de partículas pueden seguir aplicándose a preguntas relacionadas con el universo en su conjunto

Ernesto Lozano Tellechea

SERIE

LA FÍSICA DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DEL BOSÓN DE HIGGS

1. **El problema de la supersimetría**
   Joseph Lykken y Maria Spiropulu
   Junio de 2014
2. **Los orígenes históricos del mecanismo de Higgs**
   Miguel Á. Vázquez-Mozo
   Julio de 2014
3. **Más allá del modelo estándar: Una visión fenomenológica**
   Entrevista con Álvaro de Rújula
   Agosto de 2014
4. **Física de partículas y cosmología: Perspectivas teóricas**
   Entrevista con Luis Álvarez-Gaumé
   Septiembre de 2014

EN SÍNTESIS

Luis Álvarez-Gaumé es experto en teoría de cuerdas, teoría cuántica de campos y cosmología. Desde 1988 forma parte de la División de Teoría del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN).

En los años ochenta, sus trabajos contribuyeron a demostrar la coherencia interna de las teorías de cuerdas. Es también autor de algunos de los estudios pioneros sobre supersimetría y supergravedad.

El investigador analiza en esta entrevista la situación que atraviesan la física de partículas y la cosmología tras los avances acaecidos en ambas disciplinas durante los últimos años.



CORTESÍA DE LUIS ÁLVAREZ-GAUMÉ; FOTOGRAFÍA DE RAÚL JIMÉNEZ

Luis Álvarez-Gaumé,

físico de la División de Teoría del CERN, ha dedicado su carrera a investigar la estructura matemática de las leyes físicas fundamentales. Es autor de algunos de los estudios pioneros sobre supersimetría y supergravedad, un marco genérico que unifica la descripción de bosones y fermiones, los dos grandes tipos de partículas que existen en la naturaleza. Debido a esa y otras razones, la supersimetría es desde hace más de tres décadas una de las áreas de investigación más activas en física teórica. Su búsqueda experimental será uno de los principales objetivos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN a partir del próximo año, cuando el acelerador comience a operar a 14 teraelectronvoltios (TeV), la máxima energía para la que fue diseñado.

El físico es también experto en teoría de cuerdas, la hipótesis según la cual todas las partículas elementales se corresponderían, en realidad, con los modos de vibración de ciertos objetos unidimensionales un trillón de veces más pequeños que el protón. Formulada durante los años setenta, pronto se vio que una de esas «notas» tenía las mismas características que el gravitón, el supuesto cuanto de la interacción gravitatoria. A pesar de que esa propiedad ya anunciaba un gran potencial para reconciliar la gravedad y la mecánica cuántica, la verdadera popularidad de la teoría de cuerdas no llegó hasta 1984.

Ese año, junto con Edward Witten, por entonces en la Universidad de Princeton, Álvarez-Gaumé calculó qué condiciones debería satisfacer una teoría de la gravedad en varias dimensiones para no ser «anómala»; es decir, para que los efectos cuánticos no arruinasen las simetrías esenciales de la versión clásica. Ese requisito, clave para la coherencia interna de cualquier teoría, resultó ser tan restrictivo que invalidaba casi todas las posibilidades. En diez dimensiones, sin embargo, había una que milagrosamente se salvaba: el límite de baja energía de cierta teoría de cuerdas. Pocos meses después, Michael Green, por entonces en la Universidad de Londres, y John Schwarz, del Caltech, generalizaron ese resultado y demostraron la viabilidad de otro tipo de supercuerda. El hallazgo causó una revolución en física matemática. Por primera vez, una teoría parecía incluir todos los ingredientes necesarios para convertirse en la tan buscada teoría final de la naturaleza.

En esa manera de entender las leyes del universo «de arriba abajo», la actividad investigadora de Álvarez-Gaumé ha basculado en los últimos años hacia la cosmología, una disciplina que acaba de entrar en una era de precisión observacional sin precedentes. El investigador explica en esta entrevista por qué un examen más profundo de los datos cosmológicos ayudaría a los físicos a entender «de dónde saca la naturaleza su imaginación».

¿Cómo describiría la situación de la física de partículas y la cosmología tras los avances de los últimos dos años?
Podríamos decir que nos encontramos en la apoteosis del modelo estándar, tanto en física de partículas como en cosmología. Hay sin embargo varias cosas que no entendemos.

Por un lado, es magnífico que se haya encontrado la partícula escalar de Higgs. Simplemente, porque es quizá la manera más sencilla de hacer que el modelo estándar tenga sentido. Podemos decir que el modelo estándar incluye, en cierto modo, cuatro partículas de Higgs. Tres de ellas se convierten en las masas de los bosones vectoriales [los bosones W^+, W^- y Z], lo que explica por qué las interacciones débiles son de corto alcance, y luego queda una cuarta, la cual es importante para garantizar que la teoría satisfaga una condición física natural: que las probabilidades siempre sumen uno. En términos técnicos, esa condición se denomina «unitariedad».

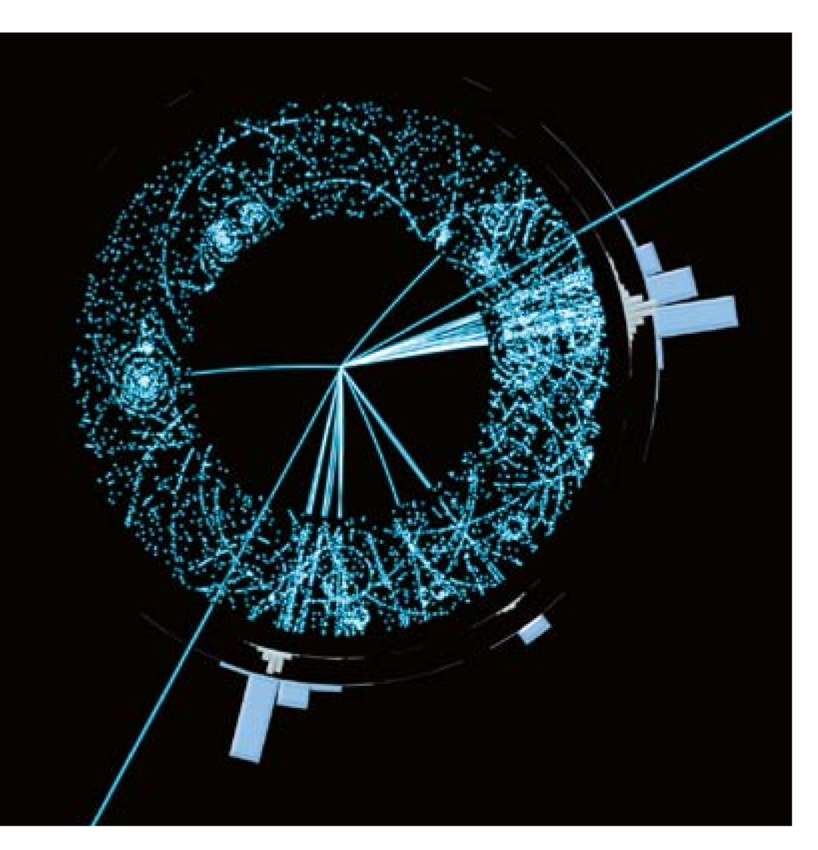
Existen varias formas de conseguir que la teoría sea unitaria. Pero parece que la naturaleza no ha querido utilizar ninguna de las otras. Eso ha supuesto una sorpresa para muchas personas, que pensaban que el higgs no existía o que, al menos, no se comportaría como el higgs «aburrido» del modelo estándar de toda la vida. Así que no deja de resultar sorprendente que, hasta energías tan elevadas, el modelo estándar funcione como un reloj suizo. Sin embargo, su problema radica en que posee una cantidad enorme de parámetros cuyo origen, o cuyo significado, no entendemos; simplemente medimos.

Y en cosmología ocurre algo similar. También tenemos un modelo cosmológico estándar, llamado Lambda-CDM, que incluye la constante cosmológica y una gran componente de materia oscura fría. Cuando se formuló allá por los años noventa, muchos pensaron que se vendría abajo en cuanto fuese posible hacer cosmología de precisión. Y parece que no. Al menos de momento, la naturaleza ha elegido la solución más sencilla a todos los problemas, de modo que nos esconde las respuestas a preguntas acuciantes de nuestro campo en energías más elevadas o en medidas más finas de los datos cosmológicos.

El bosón de Higgs plantea algunos problemas conceptuales. Uno de ellos es el problema de la naturalidad, el hecho de que su masa no es «natural» desde varios puntos de vista. ¿Podría resumirlo en términos sencillos?
Se ha vendido demasiado el papel de la naturalidad como una guía en nuestra comprensión. La naturalidad no es una ley de la naturaleza.

Tal y como la formuló Gerard 't Hooft [premio nóbel y físico teórico de la Universidad de Utrecht] en los años ochenta, la naturalidad constituye una guía útil. La cuestión es la siguiente: en una teoría con dos escalas de energía, una baja y otra alta, ¿hasta qué punto depende la física de baja energía de la escala superior?

Si al hacer un pequeño cambio en la escala de energía alta generamos efectos muy notorios en la física de bajas energías, decimos que existe un problema de «ajuste fino». A menos que los parámetros de la teoría estén ajustados con una precisión enorme, la física de baja energía dependerá de lo que suceda



¿EL PRÓXIMO GRAN HALLAZGO? La búsqueda de supersimetría será uno de los principales objetivos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN a partir del año próximo. Esta simulación representa un suceso con producción de partículas supersimétricas en el detector ATLAS, uno de los experimentos del LHC.

CERN/COLABORACIÓN ATLAS

a energías muy elevadas, que es algo que no conocemos. Y lo que a todos nos gustaría es que esa dependencia no existiese. Querríamos tener una cierta protección con respecto a lo desconocido. Eso es lo que consideraríamos «natural».

En el caso del modelo estándar, sabemos que a energías muy elevadas nos vamos a encontrar con la escala de Planck y con la estructura cuántica del espaciotiempo. Así que podemos preguntarnos: ¿depende la física de baja energía de esa escala? El problema radica en que, por lo que sabemos, la masa de la partícula de Higgs sí depende de lo que suceda a tales energías.

Todos esos argumentos hay que tomárselos con muchos, muchísimos granos de sal. También podríamos preguntarnos por qué el universo es tan grande, o por qué la constante cosmológica es tan ínfimamente pequeña. Al hacer los cálculos en teoría cuántica de campos, cada vez que en el universo hay una transición de fase se produce una contribución gigantesca a la constante cosmológica. Ahí tenemos que hacer un ajuste fino de 60 órdenes de magnitud. En el caso del higgs estamos hablando de un ajuste de unos 15 órdenes. Pero si no entendemos qué sucede con los 60 órdenes de la constante cosmológica, quizá sea un poco prematuro, o ilusorio, apelar a la naturalidad para entender la física del higgs. La naturalidad es interesante, pero creo que ya ha cumplido su papel. No debemos estirarla demasiado.

«Buena parte de los argumentos que se han dado para justificar la supersimetría a bajas energías están basados en meras ilusiones»

Pero la naturalidad tiene una larga historia en física. Si pensamos en un objeto cotidiano, el equivalente a su física de alta energía sería su estructura microscópica. Y no hace falta conocer los detalles microscópicos de una manzana para entender cómo cae la manzana.

Eso es lo que nos gustaría a todos. Pero la cuestión es que no tiene por qué ser siempre así. La naturalidad tiene historia, pero no tanta. Mucha menos de lo que parece.

Con respecto al bosón de Higgs, uno de los descubrimientos más interesantes del LHC tiene que ver con la llamada «chimenea de Planck». Al considerar el mecanismo de Higgs, a todo el mundo le gusta ver el potencial de sombrero mexicano, en el que el estado fundamental del universo se corresponde con uno de los puntos más bajos, los que están junto a las «alas» del sombrero. Pero esa es una imagen clásica. Al incluir los efectos cuánticos, puede suceder que las alas del sombrero se abran y el universo «se nos caiga». Y si suponemos que hasta la escala de Planck no hay nada más que el modelo estándar, es posible calcular si las alas del sombrero se abren o no. Y resulta que, con el valor de la masa del higgs que ha medido el LHC, 126 GeV, el universo se encontraría justo al borde de la estabilidad. Su vida media sería de miles y miles de millones de años, pero no sería estable, sino metaestable.

Se trata de un resultado muy interesante, ya que hay teorías en las que la naturalidad surge porque aparece una simetría efectiva a escalas intermedias, entre nosotros y la escala de Planck. En ese caso no necesitaríamos completar el modelo estándar con supersimetría ni nada parecido. Se trata de otro tipo de simetrías, las cuales protegerían la masa del Higgs de lo que suceda a energías elevadas.

Habrá quien opine que estos argumentos están dados a posteriori. Pero, una vez que en el LHC nos hemos encontrado con este resultado, si no paradójico, sí al menos chocante sobre la metaestabilidad del universo, podemos preguntarnos si realmente no hay nada más que el modelo estándar. Alguien puede decir que no cree en la supersimetría, ni en las dimensiones extra, ni en la hipótesis de tecnicolor... que todas le parecen ideas feísimas y que no le atraen. Pero entonces nos encontramos con este problema.

La supersimetría fue propuesta hace tiempo como posible solución al problema de la masa del bosón de Higgs. Por el momento, sin embargo, el LHC no ha encontrado ningún indicio de partículas supersimétricas. ¿Cree que esta hipótesis sigue siendo una buena candidata para resolver el problema del ajuste fino?

La cuestión del ajuste fino es subjetiva, ya que depende de lo que cada uno esté dispuesto a tragar. Yo no veo ninguna razón por la que la supersimetría deba aparecer por debajo de los 100 TeV, que es diez veces más de lo que alcanzará el LHC. Buena parte de los argumentos que se han dado para justificar la existencia de partículas supersimétricas a bajas energías están basados en meras ilusiones. No obedecen a ninguna razón física, sino a la voluntad de forzar que la escala de la supersimetría sea lo más baja posible.

Hasta ahora el LHC ha operado a 8 TeV. Así que podemos preguntarnos cuál es la escala supersimétrica más baja que permitiría detectar las nuevas partículas el año que viene, cuando el LHC funcione a 14 TeV. En tal caso, el ajuste fino podría ser del orden del 10, el 5 o el 1 por ciento. Pero aunque fuese del 1 por mil o del 1 por diez mil, creo que a la gente le preocuparía poco. Hay quien afirma que ya empieza a haber cierta tensión, pero creo que podemos decir que el jurado todavía está deliberando.

¿Ha observado una evolución en la opinión de físicos teóricos, fenomenólogos y experimentales con respecto a la supersimetría?

Hubo un período en el que mucha gente, físicos experimentales incluidos, esperaba encontrarla. Lo cierto es que la supersimetría permite un escenario estupendo, con muchas cosas que investigar. Y conduce de manera natural a las supercuerdas, por lo que en principio abarca también la gravitación. Es el sueño de un teórico. Además, si suponemos que su escala es baja, sería muy fácil descubrirla en los aceleradores, puesto que dejaría señales muy nítidas. Esa situación sería también excelente para un experimental.

Lo que ocurre es que ha habido una serie de teóricos que les han lavado el cerebro a los experimentales para hacerles creer que la supersimetría estaba a la vuelta de la esquina. Otros han sido más cautos. Y ahora que en el LHC no aparece nada, los teóricos que les han vendido el crecepelo a los experimentales se encuentran en cierta tensión.

En todo caso, vista simplemente como una teoría de campos con algunas simetrías o propiedades interesantes, la supersimetría no está excluida experimentalmente. Y es muy difícil excluir esta clase de teorías, ya que contienen muchísimos parámetros.

Otra de las razones para pensar que la naturaleza podría ser supersimétrica es la teoría de cuerdas, a la que usted

ha dedicado buena parte de su carrera. Uno de sus trabajos más citados, publicado en 1984 junto con Edward Witten, abrió el camino para demostrar la coherencia interna de las teorías de cuerdas. Pocos meses después apareció el artículo de Michael Green y John Schwarz que desencadenó la que pasaría a conocerse como «primera revolución» de las supercuerdas. ¿Cómo recuerda aquella época?

Nosotros encontramos una teoría carente de anomalías cuánticas, la que técnicamente se conoce con el nombre de supercuerda de tipo IIB. Justo después, Green y Schwarz se percataron de que las mismas ecuaciones de anomalías que nosotros habíamos calculado permitían otras soluciones.

Aquella época fue fascinante. Uno de los problemas conceptuales más profundos del modelo estándar es que, en algún momento, habrá que incluir la gravitación. Las teorías tradicionales de la gravedad no son renormalizables, lo que quiere decir que a altas energías sufren problemas gravísimos. Y la teoría de cuerdas no solo incluye la gravedad, sino que se comporta muy bien a altas energías. Además, a energías bajas permite recuperar las teorías de campos de toda la vida. Eso es muy útil.

Otra ventaja nada trivial de la teoría de cuerdas es que permite incorporar la noción de quiralidad. El modelo estándar presenta una asimetría perversa entre las partículas que podríamos llamar «diestras» y «zurdas» [una cualidad relacionada con las propiedades de las partículas de espín 1/2]. Unas y otras tienen diferentes números cuánticos; eso es algo muy perverso y que nadie entiende realmente bien. La teoría de cuerdas es la primera que consigue incorporar ese aspecto de forma coherente; es decir, una teoría que a altas energías se comporta bien y que, a energías bajas, permite recuperar teorías quirales.

«Creo que los muchos universos que predice la inflación caótica no estarían ahí si no existiese el “paisaje” de la teoría de cuerdas»

Después vino la «segunda revolución», con el descubrimiento de las dualidades [equivalencias entre las diferentes teorías de cuerdas] y, más tarde, la que podríamos llamar la tercera, con la conjetura de Maldacena. La segunda revolución, aparte de con las dualidades, llegó cuando la comunidad se percató de que la teoría no solo describía cuerdas, sino también otra clase de objetos extensos [multidimensionales] llamados branas.

Enseguida se vio que esos objetos permitían entender algunas de las propiedades matemáticas más extrañas de los agujeros negros, como su entropía, dada por la famosa fórmula termodinámica de Bekenstein y Hawking. La entropía de un sistema cuenta el número de estados microscópicos. Sin embargo, en el caso de un agujero negro, nadie entendía dónde estaban escondidos todos esos microestados.

Para usted, ¿es ese el resultado principal de la teoría de cuerdas?

Se trata sin duda de un resultado clave. Al hacer el cálculo en teoría de cuerdas, hasta el factor numérico de 1/4 que aparece en la fórmula de Bekenstein y Hawking sale bien. La teoría de cuerdas predice además que esa fórmula se ve afectada por un número infinito de correcciones. Si esas desviaciones con respecto al término principal pudieran medirse algún día, eso distinguiría la teoría de cuerdas de cualquier otra.

Sin embargo, la teoría de cuerdas resulta compatible con una enorme cantidad de teorías de baja energía. Y claro, la falsabilidad de la que hablaba Popper resulta un poco difícil de aplicar.

En un principio, muchos investigadores pensaron que era cuestión de tiempo demostrar que la teoría de cuerdas solo predecía un vacío estable y que ese se correspondería con el universo que vemos. Sin embargo, tras dos décadas de progresos espectaculares, a principios de este siglo comenzó a hablarse del «paisaje» de la teoría de cuerdas, el hecho de que la teoría permite una gran cantidad de universos posibles y no aporta ningún criterio para elegir uno. ¿Cuál es su opinión al respecto?

A mí no me gusta. Pero hay gente que lo considera uno de los resultados más profundos de la teoría de cuerdas. Es una manera de quitarse de encima el principio antrópico: básicamente, todos los universos posibles están ahí, por lo que no hay ninguna razón para preguntarnos por qué vivimos en este.

Cuando solo se conocía el sistema solar, que hubiera un planeta con vida parecía fascinante. También eso es algo muy antrópico. Pero hoy sabemos que hay una cantidad enorme de estrellas y planetas. La naturaleza, al generar tantas posibilidades, permite que algunas realidades poco probables tengan lugar.

Yo no creo tanto en el multiverso o en los universos paralelos. Pero lo que sí considero perfectamente plausible es que tengamos un solo universo en el que continuamente se van formando «subuniversos», como predice la teoría de la inflación caótica.

¿Hay para usted una relación entre los múltiples universos de un escenario como la inflación caótica y los muchos universos de la teoría de cuerdas?

Creo que los distintos universos de la inflación caótica no estarían ahí si no existiese el paisaje de la teoría de cuerdas. Lo que nos da la inflación caótica, o la inflación eterna, es una forma de «poblar» todo ese paisaje. Un mecanismo dinámico para generarlos. Para mucha gente, esa es la mejor solución desde un punto de vista científico a la pregunta de «de dónde venimos»: una teoría que a bajas energías permite múltiples leyes, como la teoría de cuerdas, y un mecanismo que permite llevarlas a cabo, como la inflación.

Sin embargo, en esta imagen tenemos que olvidarnos de explicar la mayor parte de las constantes que aparecen en el modelo estándar. En este sentido, una pregunta muy interesante es: ¿qué es fundamental? ¿Qué puede calcularse a partir de leyes básicas y qué depende del ambiente? Puede que, de las treinta o cuarenta constantes del modelo estándar, la mitad sean «ambientales»: vienen con el universo, como un código de barras, y no preguntemos más porque no encontraremos ninguna respuesta. Pero tal vez las otras veinte puedan explicarse en términos de leyes más profundas.

Por supuesto, este tipo de teorías no dan cabida al sueño einsteiniano de un único universo posible. Einstein se preguntaba si Dios tuvo alguna opción a la hora de crear el universo; es decir, si había otros universos posibles. Según el paisaje de la teoría de cuerdas, hay una cantidad enorme.

Con respecto a la inflación cósmica, en el último año y medio se han logrado dos resultados de gran importancia: las medidas de precisión de las fluctuaciones de temperatura

del fondo cósmico de microondas, obtenidas por el satélite Planck en marzo de 2013, y, este año, las medidas de polarización del experimento BICEP2. ¿Qué nos dicen esos datos sobre el período inflacionario?

El fondo de radiación nos muestra cómo era el universo cuando tenía 380.000 años. Al hablar de la inflación, sin embargo, nos estamos remontando casi al momento de la gran explosión.

Dado que el fondo de radiación cósmica se emitió cuando la luz y la materia se separaron, ir más allá con telescopios o medidores electromagnéticos es imposible. Antes de esa época, el universo era opaco. Sin embargo, los «grumos» del fondo de radiación cósmica permiten deducir qué ocurrió cuando el universo solo tenía una fracción de segundo. Es sorprendente que podamos leer algo así. A la postre, estamos escrutando las propiedades de una estructura cuántica. El inflatón [el hipotético campo responsable de la expansión inflacionaria] es un campo cuántico que, al inflarse el universo, entra en el régimen clásico. Es esa estructura cuántica que se ha estirado hasta el régimen clásico lo que se ve en los grumos del fondo cósmico.

¿Qué opinión le merecen los resultados del experimento BICEP2 sobre la polarización del fondo cósmico?

Si se confirma su relación con el período inflacionario, será uno de los resultados más importantes de la cosmología de los últimos cien años, ya que nos permitirían cartografiar lo que ocurrió unos 10^{-35} o 10^{-33} segundos después de la gran explosión. Uno casi pierde el equilibrio al pensar que ese régimen pueda medirse a través de las ondas gravitacionales primordiales [las generadas durante el período inflacionario]. Las ondas gravitacionales, primordiales o no, generan distorsiones cuadrupolares en la distribución de materia. Y son esas distorsiones las que, en parte, producen el patrón de polarización observado por BICEP2.

Con independencia del valor definitivo que pueda tomar el parámetro conocido como coeficiente r (el análisis de BICEP2 arroja un valor igual a 0,2, bastante elevado), lo crucial es que sea distinto de cero. De ser el caso, estaríamos observando por primera vez la energía que, justo después de la gran explosión, provocó que el universo aumentara su tamaño entre 10^{40} y 10^{60} veces y que, acto seguido, se desintegró en lo que hoy es materia ordinaria, materia oscura y la poca energía oscura que en la actualidad domina la expansión del universo.

El problema es que la radiación de fondo ha estado viajando durante más de 13.000 millones de años en su camino hasta la Tierra y, entre medias, se ha formado mucha estructura. Esa estructura, o «polvo», también polariza la radiación electromagnética, por lo que la pregunta clave es si los investigadores de BICEP2 han sustraído correctamente esa contribución [*véase* «¿Inflación o polvo?», por Licia Verde; Investigación y Ciencia, julio de 2014]. Pero si al tomar en cuenta ese efecto aún sobrevive una señal de radiación gravitatoria primordial, estaremos ante uno de los mayores descubrimientos de la cosmología de todos los tiempos. Yo soy optimista y creo que, una vez se despejen las dudas, esta observación tan fundamental sobrevivirá.

Uno de los grandes enigmas que afecta tanto a la cosmología como a la física de partículas es la materia oscura. Numerosos investigadores creen que las partículas que la componen podrían detectarse dentro de cinco o diez años. ¿Comparte ese optimismo?

No. La pregunta a la que intentan responder buena parte de los experimentos actuales es si la materia oscura está formada por WIMP [partículas masivas que interaccionan débilmente]. Puede que sí, pero hay otros candidatos, como los axiones. Y si la materia oscura está formada por axiones, no se verá en ninguno de esos experimentos.



EN LA FRONTERA DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA: Los agujeros negros poseen la máxima densidad de entropía que permiten las leyes de la física. En los años setenta, Jacob Bekenstein y Stephen Hawking demostraron que dicha entropía podía expresarse como un cuarto del área del horizonte de sucesos. Dos decenios después, un cálculo basado en la teoría de cuerdas consiguió reproducir ese resultado contando el número de estados cuánticos microscópicos.

A mí me encantaría que la materia oscura estuviese compuesta por WIMP, que son partículas que completan el modelo estándar. Pero también el axión ha sido propuesto con frecuencia en el marco del modelo estándar, y aparece una y otra vez en teoría de cuerdas, entre otras. Su problema reside en que se acopla muy débilmente al resto de las partículas, por lo que resultaría muy difícil detectarlo. Sin embargo, los axiones podrían dar cuenta de una parte importante de la materia oscura galáctica.

Entonces, ¿por qué parece que las candidatas más obvias siguen siendo las WIMP?

Por un lado, varias teorías que van más allá del modelo estándar, como la supersimetría o las dimensiones extra, predicen partículas de ese tipo. Pero hay que tomar también un poco de perspectiva, ya que todo depende mucho de la moda y del *lobby*. Y hay un grupo de presión pro-WIMP gigantesco, por eso parece «evidente» que estas partículas proporcionan la única explicación razonable de la materia oscura galáctica. Eso no es correcto. Afortunadamente, la naturaleza no depende de esas modas.

No hay ninguna razón para pensar que las partículas de materia oscura vayan a detectarse pronto. En el pasado, por ejemplo, cuando se consideraron las primeras cuestiones relacionadas con los bosones W y Z, las medidas de violación de paridad en átomos ya indicaban qué clase de efectos podrían observarse a la escala de energías del W y el Z. Podíamos extrapolar. Pero, por ahora, ninguna de las propuestas que van más allá del modelo estándar parece haber dejado ninguna huella a bajas energías. Al menos hasta la escala de energías que ha

explorado el LHC, la naturaleza parece de lo más aburrido que hay. Se niega a contarnos de dónde saca su imaginación.

Puede que estemos llegando al final de un ciclo. Tal vez el paradigma actual, basado en las simetrías, la localidad, etcétera, esté agotado, igual que la naturalidad. Este paradigma nos ha permitido explicar la naturaleza hasta cierto nivel, pero tal vez no funcione para preguntas relacionadas con el universo en su conjunto o con escalas de energías mucho más altas.

Hemos estado utilizando las simetrías y la localidad desde hace más de cien años. Y con muy buenos resultados. Pero ahora estamos chocando con esta especie de fronteras, como la constante cosmológica. La constante cosmológica afecta por igual a todo el universo. Es algo bastante no local, ¿no? O el campo de Higgs, que toma el mismo valor aquí que en los confines del cosmos. La constante cosmológica nos está diciendo algo realmente fundamental que no entendemos. Pero, en los últimos veinte años, el único progreso que hemos hecho ha sido cambiarle el nombre. Hoy se llama energía oscura, pero nuestra comprensión es la misma: cero.

La materia oscura es quizá más cercana a nuestro corazón porque hay una gran cantidad de modelos, ya sea con WIMP, axiones o neutrinos, que explican por qué hay un halo enorme alrededor de las galaxias. Hay además muchísimos indicios observacionales e incluso simulaciones numéricas. Pero poner todos los huevos en una misma cesta es arriesgado. Habría que buscar en todas las direcciones posibles.



¿ESTAMOS SOLOS? Algunas versiones de la teoría inflacionaria predicen que el universo observable no sería más que una «burbuja» dentro de un dominio mucho más amplio, en el que cada región se encontraría sometida a sus propias leyes físicas.

En ese posible cambio de paradigma, ¿qué papel atribuye a la gravedad?

Sobre la cuestión de la gravedad a altas energías, en los últimos años ha habido gente que ha comenzado a preguntarse si se trata verdaderamente de una interacción fundamental. Aunque a mí no me resultan convincentes, esas propuestas han intentado interpretar la gravedad en términos de una fuerza colectiva, como la fuerza de Van der Waals entre moléculas. A nadie se le ocurriría cuantizar esa fuerza.

Me refiero a las ideas de gente como Ted Jacobson [de la Universidad de Maryland] o Thanu Padmanabhan [del Centro Interuniversitario de Astronomía y Astrofísica de la India], que hace unos años retomó Erik Verlinde [de la Universidad de Ámsterdam]. Ellos consideran una explicación termodinámica, según la cual la gravitación no sería una fuerza fundamental, sino una interacción emergente, o «entrópica», derivada de acumular grandes cantidades de materia.

De todos modos, creo que si algún día se detectasen ondas gravitacionales de manera directa, mucha gente se convencería de que el campo gravitatorio debe ser tratado como el resto. Esa es la postura que adoptamos quienes hacemos teoría cuántica de campos o teoría de cuerdas. Para nosotros, el mundo es cuántico. No hay ninguna separación entre el mundo clásico y el cuántico. Podemos hablar de una cierta frontera cuando comenzamos a juntar un gran número de partículas. Pero, en lugar de pensar en todas las supuestas paradojas de la mecánica cuántica, la pregunta que es físicamente más interesante y más útil —y no filosófica— es cómo emerge el mundo clásico a partir del cuántico. Ahí muchas paradojas cuánticas desaparecen.

Con la gravitación ocurre lo mismo. Si tomamos en serio el punto de vista cuántico, la pregunta es cómo emerge el espaciotiempo. Cómo aparece el continuo espaciotemporal a partir de una estructura cuántica.

¿Cree que el problema podrá resolverse con las herramientas matemáticas disponibles hoy en día?

Con las herramientas que tenemos hoy, incluso con la teoría de cuerdas, nadie sabe cómo resolverlo. Pero tal vez obtuviésemos algunas respuestas si algún día lográsemos detectar de manera directa el fondo cósmico de ondas gravitacionales primordiales. Eso nos estaría diciendo qué ocurrió en la singularidad inicial con la que comenzó el universo.

En cierto modo, podemos decir que vivimos en un «agujero blanco». En un agujero negro, la singularidad no puede verse porque queda escondida detrás del horizonte de sucesos. Pero cuando el universo tenía el tamaño de la longitud de Planck y comenzó a expandirse, se produjeron fluctuaciones gigantescas de los campos y, con ellas, una cantidad enorme de ondas gravitacionales. Por eso podemos decir que vivimos en un agujero blanco: si pudiéramos detectar ese fondo de radiación gravitatoria, estaríamos «viendo» la singularidad inicial. Por desgracia, nuestros detectores de ondas gravitacionales están aún muy lejos de lograr algo así.

¿Cómo ve el futuro de la física de partículas después del LHC?

Para después del LHC ya han comenzado a considerarse varias posibilidades. Una de ellas sería una «factoría de higgs», un acelerador que nos permitiese medir los acoplamientos del bosón de Higgs con gran precisión. De manera indirecta, eso nos permitiría «ver» qué ocurre a energías más elevadas gracias a los efectos cuánticos.

Otra posibilidad sería una máquina de exploración: otro colisionador de hadrones que funcionase a la mayor energía posible. Hablaríamos de una máquina con un anillo de unos 80 o 100 kilómetros y que alcanzaría energías de unos 100 TeV. En mi opinión, merece la pena seguir explorando la frontera energética, ya que el coste económico no sería tan alto. Aunque, por supuesto, siempre puede suceder que nadie consiga convencer a los políticos y a las agencias de financiación.

De todos modos, creo que a los políticos y a la mayor parte de las agencias el bosón de Higgs les preocupa bastante poco. Lo importante es que sacar adelante este tipo de proyectos genera una cantidad gigantesca de tecnología. Los experimentos que se hacen en el CERN han derivado en aplicaciones en física médica, con tratamientos contra el cáncer, como la terapia hadrónica, o avances en técnicas de imagen. Aquí nació la Web, y dentro de poco veremos las consecuencias de la Grid, que es algo que volverá a revolucionar nuestras vidas. Lo que se ha producido para la sociedad en este laboratorio es miles de veces más que lo que se ha invertido en él. Desde este punto de vista, seguir explorando hasta 100 TeV estaría más que justificado.

¿Hasta qué punto sería viable una máquina así?

Uno de los requisitos pasa por emplear imanes más potentes. Los del LHC producen campos de hasta 8,33 teslas. Un acelerador de 100 TeV necesitaría imanes de entre 16 y 20 teslas. Cuando comenzó a construirse el LHC, se nos dijo que era imposible fabricar imanes de 15 metros que alcanzasen 8 teslas. Que cuánto vino habíamos bebido. Nadie se imaginaba que eso iba a funcionar. Y aquí se diseñaron los imanes hasta el punto de que luego se pudieron construir en cadenas de producción.

Es así como se focaliza la creatividad en la generación de tecnología: al intentar resolver un problema complejo y bien planteado. Lo que no podemos permitir es que las empresas tecnológicas se desarrollen únicamente por criterios comerciales. La World Wide Web es un producto de *software*. Todo lo que hacía falta para ponerla en marcha ya existía, pero era imposible comunicarse. Y si el CERN hubiera cobrado un céntimo de céntimo de euro por cada clic, ahora podríamos financiar este laboratorio durante cientos de años sin pedir dinero a nadie. Pero aquí no patentamos nada. Todo lo que se hace es con dinero público y los resultados son públicos.

Por supuesto, tales beneficios no se ven al año siguiente. Pero al cabo de una década puede comprobarse que el rendimiento es siempre muy alto. Y es difícil encontrar algo con más retornos y que no nos lleve al precipicio del mundo financiero.

Vivimos en una sociedad altamente tecnificada y cada vez más dependiente de la ciencia para su economía y su bienestar. Sin embargo, algunos conocimientos científicos básicos siguen sin formar parte de la cultura general de la población. Un estudio de 2011 de la Fundación BBVA, por ejemplo, cifraba en un 70 por ciento el porcentaje de la población española adulta que no supo responder que una afirmación como «los átomos son más pequeños que los electrones» era falsa. ¿Qué opina al respecto?

No es un problema actual. Tome usted café con humanistas y dígales que no ha leído a Chéjov ni a Dostoyevski. Le llamarán analfabeto. Pero pregúnteles qué es la entropía. Le dirán que es una tontería de científicos.

Esa actitud depende en parte de los planes de estudio, que, en países como España, parecen diseñados por personas con menos preocupaciones científicas. En otros sitios se lo toman más en serio. Países como Finlandia, Suiza, Japón... donde la enseñanza de las ciencias se considera tan importante como la de las letras. Y la ciencia es cultura. Forma parte del bagaje cultural de la humanidad.

Habría que invertir mucho más en educación. Hay quien me pegaría un tiro por decir esto, pero soy de los que opinan que habría que pagar muchísimo más a los profesores de bachillerato que a los catedráticos de último curso de universidad. Lo que no puede permitirse es que se conciba a quien va a dar clases a un instituto como un fracasado. Esa es una actitud equivocada, porque el futuro depende de ellos.

¿Cree que, además de una educación deficiente, existe también un problema en la comunicación científica?

En los medios no hay información científica suficiente. En parte porque sus responsables no entienden la ciencia y en parte porque no la consideran importante.

Por ejemplo, la mayor parte de las explicaciones que se dan sobre el mecanismo de Higgs están mal. Incluso mis compañeros de profesión parecen haber olvidado la física de bachillerato. Las analogías entre el campo de Higgs y la melaza, la nieve... son falsas: la inercia es la resistencia a la aceleración, no a la velocidad. Nuestro cerebro ha sido moldeado por la evolución para entender la física clásica, pero el mecanismo de Higgs es cuántico. Una metáfora acertada para explicarlo sería la superconductividad. Se trata de una metáfora cuántica y puede que resulte difícil de comprender, pero al menos es correcta.

Hay que tomarse la educación en serio. Tampoco cuesta tanto. Cuando la gente oye hablar del bosón de Higgs, de la exploración planetaria o de la secuenciación del genoma, lo encuentra fascinante. Hay una sensibilidad para la ciencia, pero la educación y la información que se ofrecen son muy deficientes.

Ernesto Lozano Tellechea *es doctor en física teórica y editor de* Investigación y Ciencia.

PARA SABER MÁS

Low-energy supersymmetry. Luis Álvarez-Gaumé, Mark Claudson y Mark B. Wise en *Nuclear Physics B*, vol. 207, págs. 96-110, 1 de noviembre de 1982.
Minimal low-energy supergravity. Luis Álvarez-Gaumé, Joseph Polchinski y Mark B. Wise en *Nuclear Physics B*, vol. 221, págs. 495-523, 11 de julio de 1983.
Gravitational anomalies. Luis Álvarez-Gaumé y Edward Witten en *Nuclear Physics B*, vol. 234, págs. 269-330, 2 de abril de 1984.
Anomaly cancellations in supersymmetric $D = 10$ gauge theory and superstring theory. Michael B. Green y John H. Schwarz en *Physics Letters B*, vol. 149, págs. 117-122, 13 de diciembre de 1984.
Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy. Andrew Strominger y Cumrun Vafa en *Physics Letters B*, vol. 379, págs. 99-104, 27 de junio de 1996. Disponible en **arxiv.org/abs/hep-th/9601029**
Minimal inflation. Luis Álvarez-Gaumé, César Gómez y Raúl Jiménez en *Physics Letters B*, vol. 690, págs. 68-72, 7 de junio de 2010. Disponible en **arxiv.org/abs/arXiv:1001.0010**

EN NUESTRO ARCHIVO

Problemas físicos con muchas escalas de longitud. Kenneth G. Wilson en *IyC*, octubre de 1979.
¿Es supersimétrica la naturaleza? Howard E. Haber y Gordon L. Kane en *IyC*, agosto de 1986.
Supercuerdas. Michael B. Green en *IyC*, noviembre de 1986.
El universo inflacionario autorregenerante. Andréi Linde en *IyC*, enero de 1995.
El paisaje de la teoría de cuerdas. Raphael Bousso y Joseph Polchinski en *IyC*, noviembre de 2004.
El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

El perfil de los instrumentos de viento

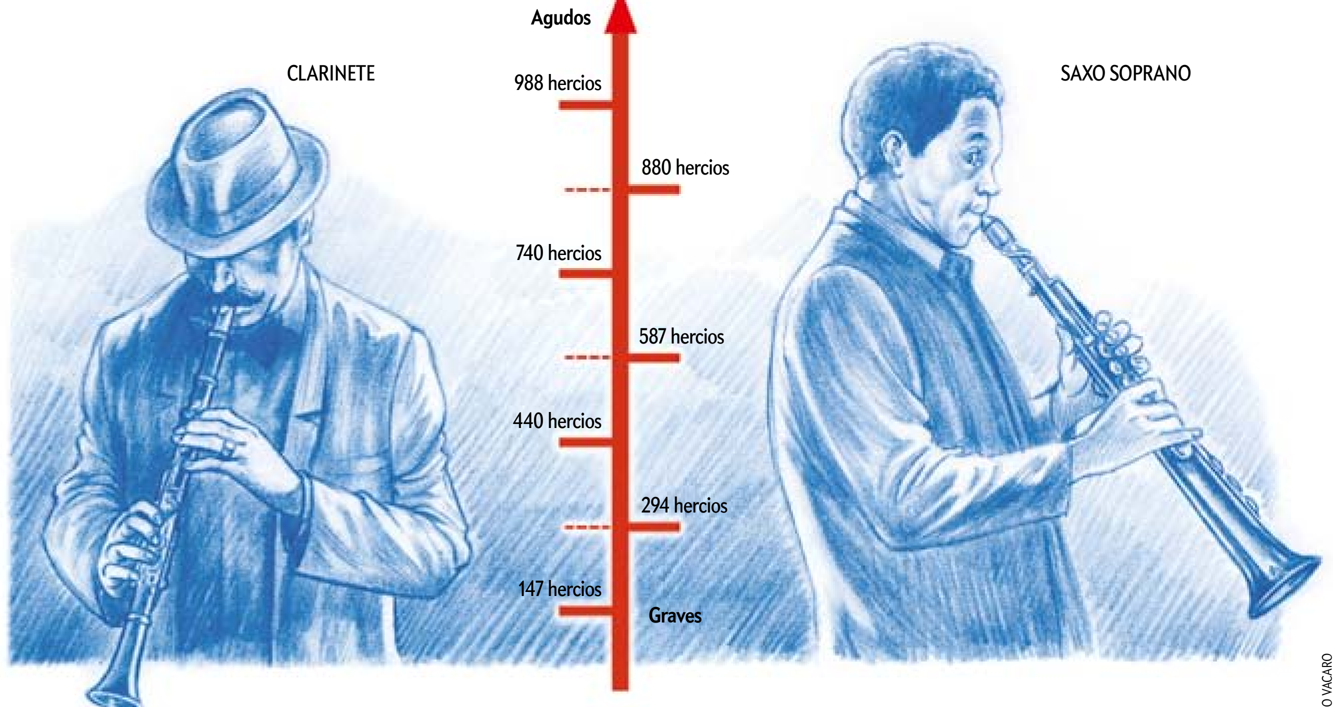
¿Qué forma dar a los instrumentos de viento? La física y la música nos dicen que solo podemos elegir entre tubos cilíndricos y tubos cónicos

Los sonidos que emiten los instrumentos de viento se deben a las vibraciones del aire que se producen en la boquilla. La altura de la nota suele relacionarse con la longitud de la columna de aire, pero rara vez se habla de la influencia del perfil del instrumento. Sin embargo, si la madera y el metal exhiben toda una variedad de aspectos, sus cuerpos son únicamente cilíndricos, como en los clarinetes, o cónicos, como en los saxófonos. La elección de esas formas no solo la justifica la sencillez de su fabricación; se basa también en sutiles limitaciones físicas y musicales.

El clarín no tiene escalas

¿Qué le pedimos a un instrumento musical? Respuesta: que permita a un instrumentista interpretar melodías a partir de las notas de una escala. La altura de cada nota corresponde a una frecuencia de vibración del aire, y el intervalo musical comprendido entre dos notas está fijado por el cociente de las frecuencias. Un salto de una octava hacia los agudos equivale a duplicar la frecuencia. La escala occidental se divide en 12 semitonos iguales: el cociente de las frecuencias de dos notas sucesivas (por ejemplo, un do y un do sostenido) será, por tanto, igual a la raíz duodécima de 2, es decir 1,0595...

Para construir un instrumento musical que produzca todas las notas, la idea inmediata es emplear un tubo para cada nota, como en la flauta de Pan. La solución es eficaz, pero musicalmente limitada: los arpegios son de ejecución difícil. Por otra parte, de un mismo tubo pueden obtenerse notas distintas, como lo ilustra el clarín, del que un buen instrumentista puede extraer hasta siete notas. Podrá facilitarnos algunos toques militares, pero apenas más.



EL CLARINETE Y EL SAXO SOPRANO ilustran las dos formas básicas que emplean los instrumentos de viento. El cuerpo del clarinete (*izquierda*) es cilíndrico, y cónico el del saxófono (*derecha*). Para estos dos perfiles, los instrumentos emiten unos sonidos cuyas frecuencias son determinados múltiplos enteros (o casi) de la frecuencia fundamental, las cuales corresponden a sonidos que interesan a la música.

Esa pobreza musical del clarín, o de otros instrumentos como el *didgeridoo* australiano o la trompa suiza, se debe a su mismo fundamento: el sonido resulta de la vibración de la columna de aire encerrado en el tubo. Esas vibraciones, creadas por los labios del ejecutante, se reflejan en el extremo abierto del instrumento. Van y vienen repetidamente y solo persisten las ondas reflejadas que contribuyen a reforzar las emitidas: el número de vibraciones del aire en la sección de la boquilla durante una ida y vuelta de la onda sonora es, por tanto, un entero.

O sea, para cada entero, una nota. Pero ¿cuál? La respuesta es más delicada de lo que parece, ya que la velocidad de propagación del sonido en un tubo depende de la frecuencia de la onda y del perfil del tubo... salvo si se trata de un cono o de un cilindro, en los que el sonido se propaga igual que en el aire libre, a 340 metros por segundo cualquiera que sea la frecuencia. Para esos dos perfiles el resultado es sencillo: las frecuencias de los sonidos emitidos son múltiplos enteros de la más baja de las frecuencias emitidas. Esta frecuencia fundamental es inversamente proporcional a la longitud del tubo del instrumento, corregida para tener en cuenta los efectos de la boquilla y el pabellón.



EN LA TROMPETA, los pistones permiten aumentar la longitud de la columna de aire derivando este hacia los canalillos, y así se rebaja la altura de la nota producida. Con las distintas combinaciones de los tres pistones, pueden conseguirse los seis tonos intermedios comprendidos entre la primera y la segunda notas de un instrumento sin pistones, como el clarín.

Obtener toda la escala sobre varias octavas

En principio, la respuesta resulta obvia: puesto que la longitud del instrumento determina las notas posibles, hagamos que varíe esa longitud. La solución más extendida es emplear pistones en el metal y orificios en la madera. En la trompeta, un pistón obtura el tubo principal y abre una derivación hacia un canalillo. De este modo, la onda debe recorrer una longitud extra, con lo que disminuye la altura de la nota soplada. Las trompetas tienen tres pistones que abren sendos canalillos de longitudes respectivamente iguales aproximadamente a un 6, un 12 y un 18 por ciento de la longitud del tubo principal. Así, al accionar un pistón, se rebaja la nota soplada en un semitono, un tono o un tono y medio. Por combinación, se consiguen seis notas suplementarias (de un semitono a tres tonos), que son precisamente las seis notas que le faltaban a nuestro clarín entre la primera y la segunda.

En la madera, no se alarga la columna de aire, sino que el ejecutante la acorta destapando los orificios practicados a lo largo del instrumento. Este se comporta entonces como si hubiera sido seccionado por el lugar que ocupa el primer orificio destapado a partir de la boquilla.

Sin embargo, el problema está resuelto solo en parte. Nos hemos olvidado de un punto delicado: si los pistones y los orificios están concebidos para completar la escala entre la primera y la segunda notas naturales del instrumento, hace falta también que igualmente completen la escala entre la segunda y la tercera nota. Ello impone que los cocientes entre notas sucesivas no dependan de la longitud del tubo.

Tal es precisamente el caso del cilindro y el cono. Pero ¿es también el de otros perfiles? La respuesta es afirmativa. Descubiertos en 1956 por el experto en acústica Arthur Benade, los pabellones de Bessel poseen una sección que aumenta proporcionalmente a una potencia de su distancia a la boquilla. Por desgracia, salvo los pabellones muy acampanados, inutilizables en la práctica, los cocientes de las frecuencias no son necesariamente números enteros, pues la velocidad del sonido en el pabellón depende de la frecuencia. Por ejemplo, para una sección que sea como la raíz cuadrada de la distancia a la boquilla, la frecuencia de la segunda nota es 2,295 veces la frecuencia fundamental, cifra que es de 3,598 para la tercera nota. Estas frecuencias no corresponden a notas de la escala y no interesan musicalmente.

Así pues, en la práctica solo el cono y el cilindro sirven como instrumentos de viento. No obstante, encontramos formas de Bessel en los pabellones del metal: modificando el modo en que se refleja el sonido en el extremo abierto, contribuyen notablemente al espectro del instrumento. De esa manera transforman la serie de armónicos a priori impares del cuerpo principal de la trompeta (cilíndrico como en el clarinete) en una serie que comprende todos los armónicos. Esa variedad de los pabellones está ausente en la madera, pues los orificios cortocircuitan el pabellón y disminuyen su efecto en el espectro del instrumento.

EN NUESTRO ARCHIVO

Física de los tubos de órgano. Neville H. Fletcher y Suszane Thwaites en *IyC*, marzo de 1983.

Interpretación de la trompeta barroca. Don Smithers, Klaus Wogram y John Bowsher en *IyC*, junio de 1986.

Matemáticas de la escala musical. Ian Stewart en *IyC*, agosto de 1990.

Aires de flauta. Édouard Kierlik y Jean-Michel Courty en *IyC*, Julio de 2012.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



Grafos, Ramsey y el teorema de compacidad

Cómo demostrar la existencia de una función que no sabemos calcular

En la columna del mes de junio hablamos sobre la siguiente generalización infinita del teorema de Ramsey:

> Si X es un conjunto numerable infinito y a cada miembro de $[X]^2$ le asignamos uno de m colores diferentes, entonces X contiene un subconjunto monocromático infinito.

Recordemos que, dado un conjunto X, $[X]^2$ denota el conjunto de subconjuntos de X que contienen exactamente dos elementos. Por otro lado, decimos que un subconjunto Y de X es monocromático si, dada una asignación de colores a los miembros de $[X]^2$, todos los elementos de $[Y]^2$ son de un mismo color.

Allí también mencionamos la existencia de una versión finita del teorema de Ramsey. Si S_n denota el conjunto de los n primeros números naturales, $S_n = \{1, 2, ..., n\}$, la versión finita nos dice que:

> Para cualesquiera m y k, existe un número n tal que, si coloreamos cada elemento de $[S_n]^2$ con uno de m colores distintos, siempre encontraremos un subconjunto monocromático con, al menos, k elementos.

Y, en particular:

> Para todo k, existe un número n tal que, si coloreamos los elementos de $[S_n]^2$ con uno de dos colores diferentes, encontraremos un subconjunto monocromático con k elementos.

Una de las ilustraciones más conocidas de este teorema nos dice que, al colorear de rojo o azul todas las aristas de un grafo completo de 6 vértices, siempre encontraremos un triángulo rojo o uno azul.

Una manera muy interesante de demostrar la versión finita del teorema de Ramsey se basa en el uso de un resultado fundamental de la lógica de primer orden: el teorema de compacidad [*véase* «Limitaciones expresivas», por Alejandro Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, enero de 2014]. Este nos dice que:

> Si C es un conjunto de enunciados de un lenguaje de primer orden, entonces C tiene un modelo si y solo si todo subconjunto finito de C tiene un modelo.

A continuación examinaremos el significado del teorema de compacidad con un ejemplo sencillo que, además, nos permitirá demostrar la versión finita del teorema de Ramsey.

El lenguaje L_R

Consideremos un lenguaje, al que llamaremos L_R, que, además de todos los símbolos lógicos de primer orden (= para la identidad, $\vee$ para la disyunción, $\wedge$ para la conjunción, $\neg$ para la negación y $\rightarrow$ para la implicación material, así como los cuantificadores de primer orden $\exists$, «existe», y $\forall$, «para todo»), incluye un símbolo de relación binaria, A. En términos sencillos, podemos pensar que $A(x, y)$ significa «x está relacionado con y».

En este caso, una *interpretación I* de L_R vendrá dada por un conjunto U de números naturales y un conjunto de pares de elementos de U, al que llamaremos A^I. Por ejemplo, el conjunto $U = \{1, 2, 3\}$ y el par $A^I = \{(1, 2)\}$ constituye una interpretación de L_R. Bajo esta interpretación, podemos afirmar que hay al menos una pareja de elementos en el conjunto A^I:

(1) $\exists x\, \exists y\, A(x, y)$.

Este lenguaje nos permite también formular enunciados falsos. Por ejemplo, podemos decir que no existe ninguna combinación de elementos que no estén en A^I:

(2) $\neg(\exists x\, \exists y \neg A(x, y))$,

algo claramente falso bajo la interpretación mencionada arriba.

Por otro lado, dado un conjunto C de enunciados de L_R, decimos que una interpretación I constituye un *modelo* de C si, bajo I, todos y cada uno de los enunciados de C son verdaderos.

Si bien nuestro ejemplo es un modelo del conjunto que solo consta del enunciado (1), no lo es del conjunto que contiene, además de este, el enunciado (2). (Un modelo de los enunciados (1) y (2) vendría dado por $U = \{1, 2\}$ y $A^I = \{(1, 2), (2, 1), (1, 1), (2, 2)\}$.)

A fin de demostrar la versión finita del teorema de Ramsey, para cada par de números naturales k y n construiremos un conjunto C_n^k de enunciados de L_R con las siguientes propiedades:

1. El conjunto $C_\infty^k = C_1^k \cup C_2^k \cup \cdots$ no tiene un modelo.
2. C_n^k tiene un modelo si y solo si existe una manera de colorear $[S_n]^2$ con dos colores diferentes tal que ningún subconjunto de S_n con k elementos o más sea monocromático.
3. Si D denota cualquier subconjunto finito de C_∞^k, entonces existe n_D tal que $D \subseteq C_{n_D}^k$.

Si para cada k construimos un conjunto de enunciados C_∞^k con tales propiedades, habremos demostrado la versión finita del teorema de Ramsey. ¿Por qué? Dado C_∞^k, el teorema de compacidad nos garantiza que existe al menos un subconjunto finito D de C_∞^k que no tiene un modelo. Pero si D carece de modelo, entonces $C_{n_D}^k$ tampoco puede tener un modelo (ya que, en general, si E y F son dos conjuntos de enunciados con $E \subseteq F$, todo modelo de F constituirá también un modelo de E). Y si $C_{n_D}^k$ no tiene ningún modelo, toda manera de colorear $[S_{n_D}]^2$ con dos colores diferentes dará lugar a un conjunto monocromático con k elementos o más.

Modelos imposibles

Así pues, para cada k y n hemos de construir un conjunto de enunciados C_n^k de L_R que satisfagan las propiedades 1, 2 y 3.

Lo primero que tenemos que garantizar es que, dada una interpretación (U, A^I) de L_R, si (x, y) está en A^I, entonces (y, x) también lo está. El enunciado que necesitamos, al que llamaremos ψ, es:

$$(\psi) \quad \forall x\, \forall y\, (A(x, y) \rightarrow A(y, x)) .$$

Ahora exigiremos que A^I solo contenga pares de elementos diferentes; es decir, que, para todo x, $(x, x) \notin A^I$. Esta propiedad queda establecida con:

$$(\chi) \quad \forall x\, \neg A(x, x) .$$

Observemos ahora que, para cada número n, todo modelo (U, A^I) de $\{\psi, \chi\}$ en el que U contenga n números naturales determina una manera de colorear $[S_n]^2$ con uno de dos colores. ¿Cuál? Si $U = \{x_1, \ldots, x_n\}$ y consideramos $i \neq j$ (con $1 \leq i, j \leq n$), colorearemos el par $\{i, j\}$ de azul si y solo si $(x_i, x_j) \in A^I$. Después, colorearemos de rojo cada par que no haya sido pintado de azul.

Ahora tenemos que añadir un enunciado que garantice que no existe un conjunto monocromático con al menos k elementos. A tal fin, para cada n definiremos primero un enunciado auxiliar, $\mu_n(x_1, \ldots, x_n)$, el cual establecerá que existen i, j, l, $m \leq n$ tales que $(x_i, x_j) \in A^I$ y $(x_l, x_m) \notin A^I$:

$$(\mu_n) \quad \bigvee_{\substack{0<i<j\leq n,\\ 0<l<m\leq n}} A(x_i, x_j) \wedge \neg A(x_l, x_m) ,$$

es decir, que $[\{x_1, \ldots, x_n\}]^2$ incluye al menos dos colores diferentes. Por tanto, junto con ψ y χ, este enunciado nos dice que $\{x_1, \ldots, x_n\}$ no es un conjunto monocromático. Por ejemplo, $\mu_3(x_1, x_2, x_3)$ se escribiría:

$$(A(x_1, x_2) \wedge \neg A(x_2, x_3)) \vee$$
$$(A(x_2, x_3) \wedge \neg A(x_1, x_3)) \vee$$
$$(A(x_1, x_3) \wedge \neg A(x_1, x_2)) .$$

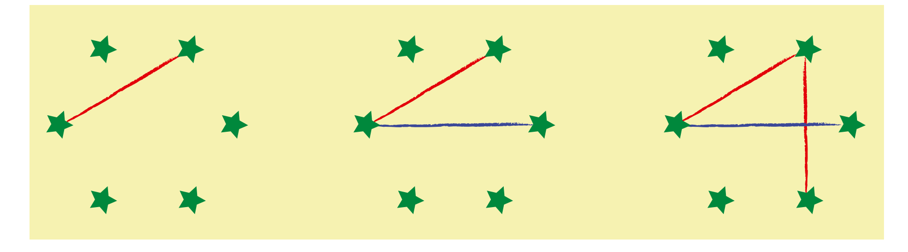
Por último, para decir que no existe ningún conjunto monocromático con k elementos o más, podemos emplear el siguiente enunciado:

$$(\sigma^k) \quad \forall x_1 \cdots \forall x_k \left(\bigwedge_{0<i<j\leq k} x_i \neq x_j \right) \rightarrow \mu_k(x_1, \ldots, x_k) ,$$

el cual nos dice que cualquier subconjunto de k elementos incluye al menos dos colores distintos.

Tan solo nos falta un pequeño detalle: para cada número n, definiremos un enunciado ϕ_n que requiera la existencia de, al menos, n elementos diferentes:

$$(\phi_n) \quad \exists x_1\, \exists x_2 \cdots \exists x_n\, (x_1 \neq x_2 \wedge x_1 \neq x_3 \wedge \cdots \wedge x_1 \neq x_n \wedge x_2 \neq x_3 \wedge \cdots \wedge x_{n-1} \neq x_n) .$$



EL JUEGO DE SIM: Por turnos, dos jugadores deben unir con un lápiz un conjunto de seis vértices. Uno de ellos empleará un lápiz rojo; el oponente, uno azul. Vence quien primero logre trazar un triángulo de su color. Una de las implicaciones del teorema de Ramsey es que el juego nunca puede acabar en empate.

Ya tenemos todos los ingredientes necesarios. Para cada n, nuestro conjunto de enunciados C_n^k viene dado por:

$$C_n^k = \{\psi, \chi, \sigma^k, \phi_1, \ldots, \phi_n\} .$$

Observemos que, por construcción, si C_n^k tiene un modelo, podremos colorear cada elemento de $[S_n]^2$ con uno de dos colores de tal manera que no haya ningún conjunto monocromático con k elementos o más. Notemos además que, para todo subconjunto finito D de C_∞^k, siempre existe algún número n_D tal que $D \subseteq C_{n_D}^k$.

Ahora bien, un modelo de C_∞^k determinaría una manera de colorear $[\mathbb{N}]^2$ con dos colores de modo que el resultado no contuviese ningún conjunto monocromático con k elementos o más. Dado que la versión infinita del teorema de Ramsey nos garantiza que siempre que coloreemos $[\mathbb{N}]^2$ con dos colores obtendremos un conjunto monocromático infinito, sabemos que C_∞^k no puede tener un modelo. En virtud del argumento dado al final del apartado anterior, esto demuestra la versión finita del teorema de Ramsey.

Alienígenas y números de Ramsey

Consideremos la función R que, para cada número natural k, calcula el número n más pequeño tal que cualquier asignación de dos colores a $[S_n]^2$ implica la existencia de un subconjunto monocromático con k elementos (es decir, el tamaño n del grafo más pequeño posible que incluye necesariamente un subgrafo monocromático con k vértices). Gracias a la versión finita del teorema de Ramsey, sabemos que $R(k)$ está bien definida para todo k.

¿Qué podemos decir acerca de la función R? La verdad, no mucho. Sabemos que $R(2) = 2$, $R(3) = 6$ y $R(4) = 18$. Pero, para $k > 4$, desconocemos casi todo sobre $R(k)$. Por ejemplo, sabemos que $R(5)$ está entre 43 y 49, pero años de investigación no nos han permitido averiguar más.

Nótese que, para poder demostrar que $R(5) = 43$, tendríamos que verificar que no existe ninguna manera de colorear todas las aristas de un grafo con 43 vértices sin que aparezca un subgrafo monocromático de 5 vértices. Ahora bien, un grafo de 43 vértices contiene $43 \times 42/2 = 903$ aristas, las cuales pueden colorearse de $2^{903} \approx 10^{270}$ formas diferentes. ¿Cómo examinar semejante número de posibilidades?

Para hacernos una idea de lo difícil que resulta conocer los valores de R, concluiremos con una curiosa anécdota. Cuenta la leyenda que el gran matemático húngaro Paul Erdős dijo una vez que, si unos invasores extraterrestres llegasen a la Tierra y amenazasen con destruir nuestro planeta a menos que encontrásemos el valor de $R(5)$, valdría la pena juntar a todos los matemáticos del mundo y emplear todos los ordenadores disponibles para obtener la respuesta. Pero, si lo que nos piden es el valor de $R(6)$, nuestra mejor opción sería luchar contra ellos.

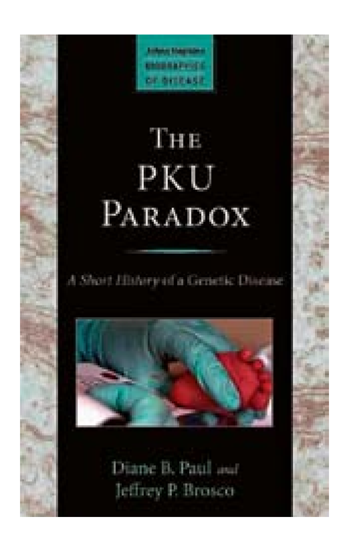
Aunque desconocemos el valor de $R(k)$ para $k > 4$, podemos acotarlo. Por ejemplo, se sabe que, para todo k:

$$\sqrt{2^k} < R(k) \leq 2^{2k} .$$

(Hay resultados más restrictivos, pero no merece la pena entrar en detalles.) Con todo, la verdad es que estamos muy lejos de saber qué valores toma R. Y el problema no es que lleve mucho tiempo calcular $R(k)$... ¡es que ni siquiera sabemos cómo empezar a calcularlo!

PARA SABER MÁS

Una de las referencias clásicas sobre la teoría de Ramsey es el libro de R. L. Graham, B. L. Rothschild y J. H. Spencer: **Ramsey Theory**, John Wiley and Sons, 2.ª edición, noviembre de 2013. El juego de SIM fue introducido por G. J. Simmons en **The game of SIM**, *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 2, pág. 66, 1969.



Fenilcetonuria

El espejo de una enfermedad molecular

THE PKU PARADOX.
A SHORT HISTORY OF A GENETIC DISEASE

Por Diane B. Paul y Jeffrey P. Brosco. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2013.

La enfermedad es un aspecto fundamental de la condición humana, desde siempre. El análisis de los huesos, la paleopatología, nos revela que los procesos morbosos son mucho más antiguos que los testimonios escritos sobre los mismos. En el hombre, la enfermedad ha constituido de forma persistente una entidad social y lingüística, así como un fenómeno cultural y biológico. En el período hipocrático, hace más de dos mil años, los médicos dependían de las palabras del paciente, sin más ayuda que su propia observación del mismo, su ojo clínico, para diagnosticar una fiebre o un ataque cardíaco. Los útiles teóricos eran la filosofía de los cuatro elementos y la teoría humoral. Pero la fiebre, lo sabemos ahora, no es una enfermedad, como se la consideró a lo largo de milenios, sino un síntoma, la respuesta del cuerpo a una circunstancia desencadenante. La teoría de los humores, como la física aristotélica, hace siglos que quedó desautorizada.

La investigación clínica emprendida por patólogos, químicos y bacteriólogos en el siglo XIX ayudó a crear el concepto de enfermedad como entidad específica fundada en un mecanismo. Durante su vida activa profesional, muchos médicos no se encontrarán nunca con la fenilcetonuria, o FCU neonatal. Pero en todas las facultades de medicina se enseñan sus notas distintivas, sintomatología, prevención y terapia. Desde los años sesenta resulta obligado, en numerosos países, el rastreo de la presencia, en el recién nacido, de este trastorno genético que causa un grave deterioro mental si no se detecta a tiempo y se remedia con una dieta estricta y difícil. Los programas emprendidos para detectar la FCU y abordar un tratamiento precoz merecen el reconocimiento de la sociedad. Quienes defienden la investigación básica en genética esgrimen el innegable éxito cosechado.

La fenilcetonuria es una enfermedad rara que afecta a uno de cada quince mil individuos. Si se detecta en el período perinatal y se le administra al recién nacido una dieta baja en fenilalanina, un aminoácido esencial de las proteínas de la alimentación, se evita el profundo deterioro mental que acarrea. Para ello se requiere que el niño portador de FCU, enteramente normal en todo lo demás, sea identificado como tal en las primeras semanas de vida. Como resultado de una mutación heredada de ambos progenitores, las personas con FCU presentan escasa o nula actividad de una enzima hepática, la fenilalanina hidroxilasa (PAH), que cataliza la conversión de fenilalanina en tirosina. Cuando se bloquea la vía metabólica normal, la fenilalanina y su metabolismo se acumulan en la sangre y en otros tejidos y deterioran el desarrollo normal del cerebro del recién nacido. El daño acontece tras el nacimiento, puesto que en el seno materno el feto se halla protegido por el metabolismo de la progenitora, que aclara el exceso de fenilalanina.

Que una intervención del entorno pueda alterar drásticamente el curso de un trastorno genético lo convirtió en un ejemplo atractivo para los críticos del determinismo genético y para los entusiastas de los tests genéticos; aquellos la utilizaban en las controversias sobre genética del cociente intelectual y sobre sociobiología; estos encontraban respaldo ético en su programa de legitimación de las pruebas genéticas.

Los síntomas característicos de la presencia de FCU son: deterioro cognitivo, convulsiones, microcefalia, erupción cutánea, andar desgarbado, hiperactividad, conducta imprevisible y un fuerte olor a moho en la orina. Al interrumpirse también la síntesis de melanina en la FCU, el paciente presenta ojos azules, pelo rubio y piel clara. Tales manifestaciones se deben a un fallo del cuerpo en el procesamiento de la fenilalanina. Los humanos no producen fenilalanina endógenamente, sino que deben obtenerla de la dieta. Parte se destina a la síntesis de nuevas proteínas y otras funciones. El resto se convierte en otro aminoácido, tirosina.

Aunque la FCU suele describirse como un simple trastorno mendeliano, la verdad es que no hay nada sencillo en todo lo que rodea a esa condición, ni siquiera la genética. Se han identificado más de quinientas mutaciones en el *locus* del gen *PAH*. Tal heterogenicidad genética va asociada con una notable heterogenicidad clínica. La mayoría de las personas diagnosticadas con FCU son heterocigotos compuestos; es decir, han heredado de sus progenitores dos mutaciones diferentes en el gen de la PAH. Ello significa que la FCU puede ser leve, moderada o severa, con distintas implicaciones para el tratamiento.

Para científicos y clínicos de comienzos del siglo XX la fenilcetonuria era un rompecabezas que vinculaba bioquímica y síntomas. Para los niños afectados y sus familias, la patología implicaba vivir con un deterioro intelectual. Los pacientes dependían de los suyos y del entorno social para sobrevivir. En los años veinte, comenzó a tomar cuerpo la consciencia, en el seno de la comunidad, de las necesidades de las personas con deterioro cognitivo. Se comprobó así que con una mejor escolarización los niños podían mejorar su cociente intelectual. Pero ya en los años treinta fracasaron varios experimentos que trataban, mediante manipulación de la dieta, a niños con fenilcetonuria. La estrategia de excluir de la dieta alimentos proteicos desembocaron en malnutrición y la opción alternativa de crear alimentos sintéticos con aminoácidos puros resultaba prohibitivamente cara. En los Estados Unidos, George Jervis y Richard Block propusieron eliminar el exceso de fenilalanina de las proteínas naturales a través de un filtrado de carbón vegetal, pero pronto se desechó.

En 1934 Ivar Absjoern Foelling, médico noruego, informó de la relación entre ácido fenilpirúvico en la orina y deterioro mental. Estructuralmente, la fenilalanina y el ácido fenilpirúvico son muy similares

(divergen solo en la sustitución de un grupo amino por un átomo de oxígeno); los dos compuestos se encuentran íntima y metabólicamente emparentados. Foelling supuso que el ácido se producía cuando se bloqueaba el metabolismo normal de la fenilalanina, resultando en la degradación del proceso metabólico en una vía anormal. A esa condición la llamó *imbecillitas phenylpyruvica*, porque cursaba con un grave daño cerebral; posteriormente se la denominó «enfermedad de Foelling», en su honor. No había por entonces forma satisfactoria de medir la fenilalanina en la sangre o en la orina. Inventó con sus colegas un ensayo para verificar que los individuos afectados presentaran unos niveles desmesurados de fenilalanina, un test de diagnóstico apoyado en el cloruro férrico. El descubrimiento de Foelling no llamó la atención, hasta que Lionel Penrose se ocupó de la fenilcetonuria.

Se debe a Lionel Penrose y Juda Hirsch Quastel su nombre vigente: fenilcetonuria (o FCU). Se trataba de una enfermedad recesiva autosómica rara, muy llamativa en su manifestación clínica, que, andando el tiempo, adquirió una gran resonancia pública al instaurar los tests neonatales rutinarios. Buena parte de la investigación inicial en la bioquímica y genética de la FCU se desarrolló en Inglaterra. De hecho, los primeros programas de pruebas generalizadas sobre FCU se realizaron en el Reino Unido. A finales de los cuarenta, Penrose parecía haber perdido toda esperanza en una terapia nutricional para la FCU. Esa reticencia se quebró en 1951 con las investigaciones de Louis Wolf y David Vulliamy, que abogaban explícitamente a favor de la tesis de que la fenilalanina, o uno de sus metabolitos, circulante a altas concentraciones en sangre deprimía la actividad mental; por tanto, la reducción de esos niveles de fenilalanina podría restablecer la función cerebral normal. Propusieron que los niveles de fenilalanina en sangre podrían reducirse o por incremento de fenilalanina o por restricción de su ingesta en la infancia hasta un mínimo.

Por aquel entonces la búsqueda de mecanismos subyacentes a las enfermedades había ido desplazándose hacia el dominio celular, cromosómico e incluso molecular, al ir estrechándose los lazos entre enfoques bioquímicos y cuadros clínicos. La anemia falciforme, por ejemplo, se consideró arquetipo de enfermedad molecular por Linus Pauling y sus colaboradores en 1949; más tarde se la asoció a determinada mutación de interés evolutivo. En esa época de innovación radical de la biomedicina, la fenilcetonuria pasó a ocupar el puesto de relieve que le confirieron los análisis y tests pediátricos, demandados estos por una sociedad cada vez más consciente de su importancia. En los años cincuenta, se desarrolló un tratamiento para la fenilcetonuria con lo que quedaba claro que, a través de una intervención médica, podían evitarse el deterioro mental y otros efectos de una condición hereditaria. Se aportaron pruebas experimentales de mejora de algunos aspectos de la enfermedad, sobre todo si se empezaba el tratamiento antes de que apareciesen los síntomas. Los ensayos convergieron en el desarrollo del test de orina. La prueba de la orina para descubrir la presencia de FCU comenzó en varios países (entre ellos Estados Unidos, Reino Unido y España) en ese decenio de los cincuenta. Todos los investigadores que se ocuparon del tratamiento dietético de la FCU advirtieron que resultaba decisivo intervenir en la dieta en un momento precoz, antes de que la degradación neuronal se hiciera patente.

Pero el salto hacia delante en las pruebas y análisis se produjo en los años sesenta con el desarrollo de un test sanguíneo más fiable y económico que podía administrarse a los pocos días del nacimiento, antes de producirse el daño cerebral. Los padres de los niños con retraso mental empezaron a demandar la práctica de exámenes y análisis generalizados en neonatos. Un decenio después, ese control de la presencia de FCU en el recién nacido (el *newborn screening*, o NBS) se había convertido en proceso rutinario en muchos países. Lo mismo que con la viruela, fiebres tifoideas y pelagra, el control de la FCU implicaba la creación de un nuevo método para domeñar una enfermedad temida.

La prueba del cloruro férrico en orina la remplazó en 1962 el microbiólogo Robert Guthrie con el desarrollo de un ensayo de inhibición bacteriana (BIA). En sus trabajos de oncología, Guthrie empleaba un ensayo de inhibición bacteriana para discriminar antimetabolitos en sangre. (Los antimetabolitos son moléculas que inhiben un proceso metabólico normal; puesto que pueden detener la división celular, se emplean comúnmente en quimioterapia oncológica.) En lo que aquí importa utilizaba un conocido antagonista de la fenilalanina, la beta-2-tienilalanina, que se agregaba a una placa de agar junto con esporas de *Bacillus subtilis*. Las bacterias sintetizan su propia fenilalanina, pero el inhibidor de beta-2-tienilalanina bloquea una etapa metabólica crucial en este proceso y la bacteria no puede reproducirse. Cuando se coloca sobre el medio un disco de papel de filtro, impregnado con suero sanguíneo procedente de un individuo afectado, la fenilalanina, que se halla a una concentración elevada en el suero, se difunde sobre el medio y queda a disposición de las bacterias, que, abastecidas, crean una zona de crecimiento bacteriano en torno al disco. Pero el examen acontecía cuando los niños ya habían sufrido deterioro. Una ligera modificación permitió trabajar con sangre entera y simplificar el proceso para generalizarlo.

La invención de Guthrie de un bioensayo para la FCU eficaz fue saludado por la comunidad científica como un logro extraordinario. Se le consideró uno de los hitos principales de la medicina reciente, no menor que el desciframiento del código genético. El ensayo servía para prevenir el deterioro mental, que podía así domeñarse y se convertía en modelo para otras patologías congénitas del metabolismo asociadas con retraso mental. En los años noventa y primer decenio del siglo XXI, la FCU sirvió de ejemplo paradigmático para la identificación de decenas de enfermedades. En un artículo aparecido en *Nature* en 2012 se aseguraba incluso que el tratamiento de recién nacidos con FCU y otros trastornos metabólicos e inmunitarios resultaba a veces tan sencillo como un cambio en la dieta. Pero el problema es que no hay nada sencillo en seguir una dieta FCU.

En el medio siglo transcurrido desde el advenimiento de los primeros programas de análisis generalizado de la fenilcetonuria, se han producido cambios fundamentales en el contexto de los debates sobre los análisis perinatales. Particular resonancia tuvo la investigación genética de Savio Woo y sus colaboradores. En 1983 hicieron público que habían aislado y clonado el gen de la hidroxilasa fenilalanina humana (PAH). Se creyó que de esa investigación se pasaría a la sustitución de una terapia dietética de la FCU a una terapia por manipulación génica. Pero, una vez más, las esperanzas en terapia génica terminaron por disiparse. Lo mismo ha ocurrido con otros intentos más recientes, como la administración suplementaria de sapropterina, conocida con el nombre comercial de Kuvan, un cofactor enzimático para la hidroxilasa de fenilalanina.

—*Luis Alonso*



Estructuras del universo

Manual canónico sobre el origen y constitución del cosmos

THE COSMOS.
ASTRONOMY IN THE NEW MILLENIUM

Por Jay M. Pasachoff y Alex Filippenko. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

El estudio de los orígenes, sean de la vida, del hombre, del planeta, de la galaxia o del universo entero responde a una inquietud que atraviesa los siglos. De una forma u otra, todos esos temas hallan explicación última en la astronomía, la ciencia sobre un universo que, de acuerdo con el modelo cosmológico estándar, inició su andadura en el instante de la gran explosión (*big bang*), hace unos 10.000 millones de años. En los primeros 10^{-30} segundos, el espacio se expandió con celeridad superior a la velocidad de la luz. Esa «inflación» alisó el espacio y magnificó las sutiles fluctuaciones cuánticas de la densidad de la sopa caliente primordial de materia y energía. Fluctuaciones que, andando el tiempo, desencadenaron la formación de galaxias y dejaron ligeras variaciones en la temperatura de la radiación cósmica del fondo de microondas, clave esta para deducir la composición del universo.

De la exploración de la mayoría de los planetas del sistema solar hemos cosechado una diversidad variopinta de suelos y lunas. Se nos han revelado planetas en órbita alrededor de otras estrellas, asentando nuestra esperanza de que pueda existir vida en ellos. Hemos resuelto muchos misterios en torno al nacimiento y muerte estelar. Entre otras cosas comprendemos la génesis, en el interior de las estrellas, de los elementos de nuestro cuerpo, como el oxígeno o el calcio. Con el Telescopio Espacial Hubble, con el Observatorio Chandra de rayos X y con el Telescopio Espacial Spitzer hemos examinado galaxias al poco de nacer, lo que aportó claves importantes sobre el origen y evolución de nuestra Vía Láctea.

Se ha construido una constelación de grandes telescopios en la cima de las montañas. Docenas de radiotelescopios exploran su región del espectro a una finísima resolución. Y están en proyecto modelos todavía más potentes, como el Telescopio de Treinta Metros, el Telescopio Gigante de Magallanes y el Telescopio Europeo Extremadamente Grande, para investigar en el óptico y el infrarrojo. El Telescopio Espacial Hubble, puesto al día con nuevas cámaras, envía datos de interpretación sugestiva al tiempo que los observatorios espaciales transmiten imágenes realizadas con rayos gamma, con rayos X y con radiación infrarroja. Nuestras ideas sobre el sistema solar fueron tomando cuerpo mucho antes de la invención del telescopio. La antigüedad clásica conoció hasta cinco planetas: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

Disponemos de un parámetro fundamental en astronomía: la luz, que viaja a una velocidad finita, de 300.000 kilómetros por segundo. Si algo sucede muy lejanamente, tardaremos en percibirlo. La luz procedente de nuestra Luna tarda 1,3 segundos en llegar hasta nosotros; la procedente del Sol unos 8 minutos, la que viene de la otra estrella más cercana unos 4 años (decimos que está a 4 años luz). El universo es tan inmenso, que, cuando recibimos luz o radioondas de un objeto a través de la Vía Láctea, estamos contemplando lo que aconteció hace decenas de miles de años.

Aun cuando no podemos alcanzar una estrella sí podemos examinar su luz; de su estudio deducimos la temperatura (a partir del color) y elementos químicos que hay en la proximidad de su superficie (a partir de sus líneas espectrales). El estudio de la luz de una estrella nos revela la velocidad con que se mueve con respecto a nosotros, si acercándose o alejándose. En realidad, la técnica se aplica a todo tipo de objetos, incluidos los planetas. El efecto que el movimiento ejerce sobre las ondas se conoce por efecto Doppler, en honor de Christian Doppler. Se da en todo tipo de ondas (sonoras, lumínicas, etcétera). Cuando un objeto se aproxima, las ondas que percibimos se van acortando; cuando se aleja, se van alargando. Las longitudes de onda se desplazan hacia el azul del espectro cuando los objetos se van acercando y hacia el rojo cuando se van distanciando.

Los planetas parecen derivar lentamente en una dirección, de oeste a este, con respecto al fondo de estrellas. Ese movimiento unidireccional se denomina movimiento progrado. Cuando el planeta se mueve en sentido contrario, hacia atrás, se habla de movimiento retrógrado. Aristóteles creía que la Tierra era el centro del universo; en su opinión, el Sol y las estrellas giraban alrededor de la Tierra. Ideó un sistema cosmológico constituido por 55 esferas concéntricas. El movimiento natural de cada esfera era el de rotación. Los planetas iban a lomos de alguna de esas esferas. Los movimientos de unas esferas repercutían en el de otras. Admitía una suerte de movimiento retrógrado. La última esfera era la de las estrellas fijas.

En torno al 140 d.C., Claudio Ptolomeo presentó una teoría detallada del universo que explicaba el movimiento retrógrado: los planetas viajarían en círculos pequeños que se movían sobre círculos mayores de las órbitas de los planetas. Los círculos pequeños se llaman epiciclos; los grandes, deferentes. Igual que el aristotélico, su modelo era geocéntrico.

Debemos a Nicolás Copérnico, astrónomo polaco del siglo XVI, la concepción actual del sistema solar y del universo. Copérnico sugería una teoría heliocéntrica, postulada dieciocho siglos antes por Aristarco de Samos y desarrollada por Johannes Kepler. De acuerdo con la primera ley de Kepler, formulada en 1609, los planetas, en su órbita alrededor del Sol, dibujan una elipse con el astro en uno de los focos. El otro foco se halla vacío. A tenor de la segunda ley kepleriana, o de las áreas, la línea que une el Sol con un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. Por fin, la tercera ley de Kepler aborda el tiempo que invierte un planeta en girar alrededor del Sol, o período de revolución. Establece que el cuadrado del período de revolución es proporcional al cubo del eje semimayor de la elipse. (Una aplicación terrestre de la tercera ley de Kepler corresponde a los satélites geoestacionarios.)

Galileo Galilei, quien se adhirió al sistema heliocéntrico en los años noventa del siglo XVI, construyó su propio telescopio. Reparó en que las pautas luminosas y sombrías de la Luna indicaban la presencia de cráteres. Describió también

montañas y «mares». En 1612 descubrió las manchas solares, una prueba adicional de que los objetos celestes no eran perfectos. Con unas lentes de no más de 20 o 30 aumentos revolucionó nuestra visión del cosmos. Al apuntar a Júpiter, lo que hasta entonces era un mero punto de luz se transformó en un disco, con cuatro lunas a su alrededor. Estaba claro que había cuerpos del sistema solar que no giraban en torno a la Tierra.

Hacia finales del siglo XVII, Isaac Newton sustituyó las lentes por espejos (que no sufren la aberración cromática). Le siguieron, mediado el siglo XIX, telescopios reflectores cada vez más potentes. Kepler llegó a sus leyes por ensayo y error. Newton aportó la doctrina física que explicaba la existencia de tales leyes. Descubrió la descomposición de la luz visible en espectro de colores, para volver luego a recombinarse en luz blanca. Pero más importante aún fue su trabajo sobre el movimiento (ley de inercia, de aceleración y de acción y reacción) y sobre la gravitación, que expuso en los *Principia*, publicados en 1687.

El vecino inmediato a la Tierra es su satélite. Se halla a unos 380.000 kilómetros. Su superficie está moteada de cráteres. Posee zonas suaves y oscuras (los mares). En superficie, la gravedad de la Luna es un sexto de la que experimentamos en la Tierra. Tan ligera es esa gravedad que cualquier atmósfera y cualquier agua que pudiera haber alojado se escaparían al espacio. La Luna gira sobre su eje, a la misma velocidad que evoluciona en torno a la Tierra, por lo que muestra siempre la misma cara en nuestra dirección.

El planeta más próximo a la Tierra es Venus, con una temperatura uniforme de 735 grados Kelvin, donde no parece que pueda medrar la vida. Allende Venus encontramos a Mercurio, cuya cercanía al Sol explica la temperatura de su atmósfera: las partículas de gas se mueven con una rapidez tal, que la atracción gravitatoria del planeta, muy débil, difícilmente podría retenerlas de forma permanente. Mercurio, Venus, la Tierra y Marte comparten muchos rasgos. Son pequeños y poseen una superficie rocosa, rodeada por una atmósfera fina y transparente. Marte es solo un 53 por ciento del diámetro de la Tierra y posee un 10 por ciento de su masa. La atmósfera es mucho más tenue que la de la Tierra, demasiado fina para que los humanos puedan respirar en ella.

Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno integran el grupo de los planetas gigantes. Poseen mayor masa y menor densidad que los interiores, de cuya estructura interna difieren también. Todos los planetas gigantes presentan una atmósfera casi enteramente de hidrógeno y helio. El pequeño porcentaje de elementos más pesados es mayor en Urano y Neptuno que en Júpiter y Saturno. El tamaño de los planetas gigantes del sistema solar oscila entre cuatro y 11 veces el diámetro de la Tierra. Júpiter es el mayor. Cuatro de sus numerosas lunas, muy brillantes, fueron descubiertas ya por Galileo. Saturno es famoso por sus hermosos anillos, que se extienden en su plano ecuatorial y están inclinados con respecto a la órbita del planeta. Hoy sabemos que todos los planetas gigantes presentan anillos.

Plutón posee un diámetro de 2300 kilómetros, solo el 20 por ciento del terrestre. Aceptado como planeta desde 1930 hasta 2006, se ha desgajado del grupo. Comparado con los ocho oficiales, su órbita elíptica es la que más se aleja de la circularidad; resulta tan excéntrica, que cae, en parte, dentro de la órbita de Neptuno. Además de los planetas y sus lunas, hay otros muchos objetos de la familia del Sol. Los más espectaculares, vistos desde la Tierra, son los cometas, que encierran valiosa información sobre el origen del sistema solar. Súmense los asteroides, que son planetas menores, junto con bloques de rocas conocidos por meteroides. Más allá de la órbita de Neptuno encontramos una población de objetos helados con un diámetro de escasos kilómetros. Forman el cinturón de Kuiper.

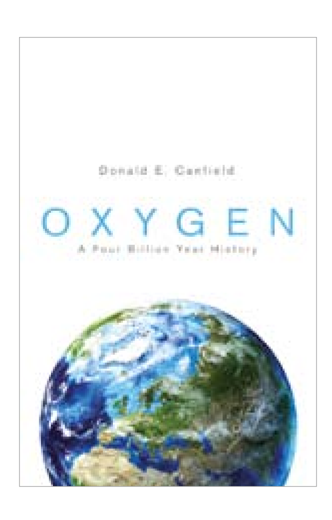
Decisivo para la existencia del hombre, el Sol constituye la fuente de luz y calor de la Tierra. Vemos del Sol la fotosfera, de gas brillante, con una temperatura de 5800 kelvins. Sus propiedades son las típicas de una estrella, con un 92 por ciento de los átomos y núcleos de la parte externa formado por hidrógeno y un 8 por ciento por helio. La fotosfera solar y sus aledaños inmediatos exhiben una variedad de fenómenos: manchas solares, fulgores, eyecciones de masa coronal, filamentos, prominencias, etcétera. Allende la fotosfera se encuentra el interior solar, en cuyo núcleo se genera toda la energía, donde reina una temperatura de 15.000.000 kelvins.

Aun cuando brillan durante largo tiempo, las estrellas no son eternas. Terminan por morir. Cuanto mayor masa poseen, más breve resulta su estancia en la secuencia principal. Una estrella como el Sol no es especialmente masiva y pue-

de permanecer en la secuencia principal durante miles de millones de años. En su muerte, atraviesa las fases de gigante roja, nebulosa planetaria y enana blanca. Las fuerzas peculiares de la presión de degeneración de electrones y neutrones (un efecto de la física cuántica) explican la muerte estelar. El caso más extraño se produce en la muerte de estrellas dotadas de mayor masa, que contenían un centenar de masas solares cuando se hallaban en la secuencia principal. Una vez que atraviesan la fase de explosión de supernova, el núcleo podría seguir contando con dos o tres masas solares.

No hay nada en el universo que pueda mantener la masa remanente contra la fuerza de la gravedad. Y, por tanto, cae en colapso. El resultado es un agujero negro, en el que la materia desaparece del contacto con el resto del universo. La gravedad es la fuerza dominante que conforma la estructura y evolución del universo. Los agujeros negros aportan un laboratorio para contrastar las predicciones más extremas de la teoría general de la relatividad de Einstein, la herramienta más sólida que poseemos para describir la gravedad.

—*Luis Alonso*



Oxígeno

Testigo de la evolución de la vida sobre la Tierra

OXYGEN. A FOUR BILLION YEAR HISTORY

Por Donald E. Canfield. Princeton University Press, Princeton, 2014.

En este viaje a lo largo y ancho de la Tierra, se revisa, desde una perspectiva geobiológica, la historia del oxígeno que enriquece su atmósfera. El curso seguido, uno de los acontecimientos más importantes de la historia de la Tierra, arranca de un planeta protoarqueano, anaerobio; la meta final, un mundo de oxígeno. En la explicación de ese tránsito se entreveran dos temas capitales de la investigación contemporánea, la evolución del aire respirable y la reconstrucción geoquímica de las rocas primigenias.

Carl Wilhelm Scheele descubrió en 1771-72 que el aire constaba de oxígeno, dióxido de carbono y una fracción importante de «aire viciado» (nitrógeno). En 1774 escribió a Antoine Lavoisier, dándole cuenta de sus experimentos y pidiéndole consejo. Por la misma época, Joseph Priestley se encontraba en París defendiendo sus propios experimentos sobre producción de oxígeno. Lavoisier no tardó tampoco en crearlo. Liberándose de las trampas de la teoría del flogisto, el químico francés reconoció el carácter elemental del oxígeno y le impuso el nombre que hoy conocemos (etimológicamente, «productor de ácido»). Lo mismo que Scheele, exploró su función en la respiración y, con mayor precisión que el sueco, estimó que el oxígeno comprendía en torno al 25 por ciento de la atmósfera terrestre. Se le recrimina a Lavoisier conceder escaso mérito a Priestley y ningún reconocimiento a Scheele en sus escritos sobre el oxígeno. [*véase* «Lavoisier. La revolución química», por Marco Veretta. *TEMAS de IyC* n.º 64, 2011].

Nuestro planeta se encuentra a cierta distancia del Sol, dictada por su órbita, lejanía suficiente para situarnos en la llamada zona de habitabilidad, pues permite la persistencia del agua en fase líquida. Si estuviera más cerca del astro, como Venus, la temperatura se elevaría muchísimo y el agua líquida se convertiría en vapor, que iría a la atmósfera. Parte de esa agua podría perderse para siempre a través de procesos químicos de la estratosfera. Si la Tierra se hallara más alejada del Sol, como Marte, su superficie terminaría por enfriarse y congelarse.

Muchos organismos no utilizan la energía solar. Obtienen la energía precisa en reacciones de oxidación-reducción. Aunque necesaria, la energía no lo es todo. Las células están hechas de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo y sulfuro; amén de una constelación de metales traza y otros elementos. De ellos se componen membranas celulares, material genético (ADN y ARN), proteínas y otras moléculas que intervienen en la maquinaria celular. Otro ingrediente básico de la vida es un entorno estable con agua.

El agua tiene propiedades especiales. En virtud de su estructura química, la molécula de agua es bipolar, dotada con una carga positiva en un lado y una carga negativa en el lado opuesto. Esta condición le permite disolver todo tipo de sustancias iónicas, muchas de las cuales constituyen los bloques de construcción de la vida. El agua suministra también el medio a través del cual se expulsan de la célula los productos de desecho. Por su capacidad de disolver y transportar los componentes de la vida y por su capacidad para albergar estructuras de membrana, el agua es una sustancia química única. Quizá podría haberse dado otro tipo diferente de vida, con propiedades distintas. Opciones alternativas son el amonio, metano, ácido sulfúrico y fluoruro de hidrógeno. A su debida temperatura y presión, comparten algunas propiedades del agua, aunque no todas. Se trata, empero, de alternativas que permanecen en el terreno de la especulación.

En la regulación de la temperatura de la Tierra interviene el ciclo del carbono. La pérdida de calor procedente del interior de la Tierra (estimada en unos 5000 grados en promedio) provoca el movimiento y mezcla del manto terrestre en un proceso de convección. La convección crea regiones de erupción volcánica, sobre todo en los océanos, que dividen la corteza terrestre en una serie de placas móviles que cabalgan sobre el manto. El dióxido de carbono procede de los volcanes y de las chimeneas hidrotermales del suelo oceánico. Muchas de esas fuentes de CO_2 se originan en el proceso de tectónica de placas. Si eliminásemos la tectónica de placas, podríamos seguir encontrado agua líquida en la atmósfera, al menos en ciertos lugares, pero la vida vería muy mermados sus efectivos. No habría un suministro incesante de nutrientes que le aportaran el sustento. Ni se produciría el ciclo de los sedimentos.

La Tierra actual presenta un alto contenido en oxígeno. Para que este se acumulase, tuvo antes que generarse, lo que exigió la presencia de organismos productores de oxígeno. En 1779, Jan Ingenhousz

describió el mecanismo de la fotosíntesis, uno de los principales fenómenos de la historia de la vida. ¿De qué modo procede la producción de oxigeno por fotosíntesis? Se empieza por capturar la luz a través de un complejo antena, constituido por pigmentos. Una vez capturada, la energía lumínica se transfiere a los centros de reacción, donde se genera oxígeno. Existen dos centros, ambos acoplados y denominados fotosistema I y fotosistema II. En la fotosíntesis oxigénica el electrón procede del agua. (La fotosíntesis oxigénica no fue probablemente el primer tipo de fotosíntesis. Hubo antes bacterias fotosintéticas anoxigénicas.) La clorofila, que constituye parte integrante del complejo antena y es componente crítico de ambos fotosistemas, produce la forma altamente oxidante de P680 en el fotosistema II, que puede extraer del agua electrones. Ahí reside la principal innovación de la fotosíntesis oxigénica. Pero, ¿cómo fue la vida antes de la aparición de los organismos fotosintetizadores?

Los metanógenos pueden combinar H_2 y CO_2 para producir metano en las chimeneas hidrotermales. Muchos metanógenos se hallan adaptados a temperaturas por encima de los 100 ºC. Incluso sin oxígeno, esos metanógenos pueden desarrollarse y dividirse. Hoy, las bacterias fermentadoras desempeñan un papel principal en la descomposición de materia orgánica, extraen energía y producen moléculas que pueden utilizarse por otros microorganismos. Los metanógenos heterotróficos pueden aprovechar esos compuestos orgánicos simples para producir metano y CO_2. Cabría, pues, la posibilidad de que un ecosistema operase con metano, con productores primarios constituidos por metanógenos autotróficos y con consumidores que abarcarían bacterias fermentadoras y metanógenos heterotróficos. Antes de los organismos fotosintetizadores pudo haber también vida basada en la reducción del sulfato. En ese proceso, las bacterias adquieren energía y pueden desarrollarse a través de la reducción de sulfato con materia orgánica o H_2; se producen luego sulfuro y dióxido de carbono. El H_2 podría haber sido su fuente verosímil de energía.

También antes de la aparición de organismos fotosintéticos pudo haber vida basada en el hierro. En forma ferroso persiste en ausencia de oxígeno y se disuelve fácilmente en el agua. Con una atmósfera anóxica, el ion ferroso procedente de las chimeneas hidrotermales se habría ido acumulando en las profundidades del mar. La geología aporta, en efecto, pruebas de dicha acumulación en masa en un tipo particular de roca sedimentaria, las denominadas formaciones de hierro en banda. Ese tipo de rocas (BIF, de *banded iron formations*) abundan sobre todo en registros rocosos con fecha de hace más de 2500 millones de años. En una fase precedente a la producción masiva de oxígeno en la Tierra, la actividad volcánica habría lanzado a la atmósfera H_2, SO_2, CO_2 y H_2S. Igual que en los sistemas hidrotermales, las poblaciones productoras de metano habrían recibido H_2 y CO_2 de origen volcánico. Habría una abundante vida metanógena en suelos saturados, lagos y océanos.

El curso evolutivo que condujo a las cianobacterias, productoras de oxígeno, fue un tanto alambicado y complejo. Les precedieron al menos dos tipos de fototrofos anoxigénicos, organismos fotosintéticos que no producían oxígeno. Cada uno de ellos desarrolló un fotosistema peculiar para convertir luz en energía de la célula. En las cianobacterias emergieron fotosistemas acoplados, como una suerte de fusión aparente de los dos tipos fototróficos anoxigénicos. Al sintetizar clorofila, las cianobacterias se apropiaron también, con ciertas modificaciones, de los sistemas productores de pigmentos de sus precursores fototróficos anoxigénicos. Además, para la evolución del complejo evolutivo del oxígeno, se sirvieron de un grupo de cuatro manganesos tomados de enzimas preexistentes empleadas en la conversión del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. No fue la aparición de las cianobacterias un acto único de magia. La evolución tuvo que recorrer un largo camino.

El registro de la vida sobre la Tierra sugiere que las cianobacterias aparecieron antes del episodio de la gran oxidación (GOE, de *great oxidation event*) de la atmósfera terrestre, que sucedió hace entre 2300 y 2400 millones de años. De hecho, las cianobacterias subsistieron en una atmósfera en buena parte anóxica durante centenares de millones de años. Antes del GOE los niveles de oxígeno se situarían en torno al 1 por ciento de los niveles actuales. Hoy, el aire que respiramos es oxígeno en un 21 por ciento.

Una vez asentados, los organismos productores de oxígeno prosperaron, se multiplicaron y evolucionaron en otras formas de vida. Verosímilmente, los niveles de oxígeno durante los primeros estadios del Fanerozoico se movieron en un rango del 10 al 21 por ciento. Las mediciones geoquímicas sugieren un incremento sustancial de la oxigenación del océano durante el Silúrico tardío y el Devónico inicial, con una drástica multiplicación de los peces en el mar. Un incremento del oxígeno atmosférico se refleja en la amplia dispersión y evolución de las plantas continentales.

Las cianobacterias cambiaron el curso de la vida. Trajeron oxígeno a la Tierra y permitieron la evolución planetaria de los organismos. La importancia de las cianobacterias no se agota ahí. Cianobacterias fueron los primeros organismos fotosintéticos de la Tierra en utilizar el agua como fuente de electrones. A diferencia del sulfuro, ion hierro e hidrógeno empleados por los organismos fotosintéticos anoxigénicos, el agua se encuentra en cualquier parte de la superficie terrestre. Ello significa que la producción biológica dejaba de estar limitada por la fuente de electrones, para depender de los nutrientes y otros constituyentes de la composición celular. Con la evolución de las cianobacterias, la Tierra entró en la senda que le llevaría a convertirse en un planeta verde.

Allí donde la materia orgánica escaseó antes de las cianobacterias, abundaría después. La degradación de esa materia orgánica sirvió de motor de los ecosistemas. A mayor cantidad de materia orgánica, ecosistemas más activos y, probablemente, más complejos. El incremento en la complejidad de los ecosistemas habría resultado también de la nueva disponibilidad de oxígeno y la evolución subsiguiente de los organismos que lo utilizaban. Se produjo una diversidad biológica explosiva cuando comenzaron a abundar la materia orgánica y el oxígeno.

Se estima que la tasa neta de producción primaria en la Tierra es de unos $8{,}8 \times 10^{15}$ moles de carbono por año. Si la comparamos con la masa de oxígeno en la atmósfera, hallaremos que este podría haberse generado en solo 4200 años. La merma o remoción del oxígeno atmosférico se debe a varios factores; reacciona con la materia orgánica, con la pirita, con sulfuros o con el hidrógeno. Muchos son los procesos naturales (retroalimentaciones positivas y negativas) que controlan y estabilizan la concentración de oxígeno en la atmósfera. El conocimiento de tales procesos nos revela la interacción entre biología, química y geología. Una interacción, cambiante a lo largo del tiempo, que ha conformado la química terrestre.

—Luis Alonso

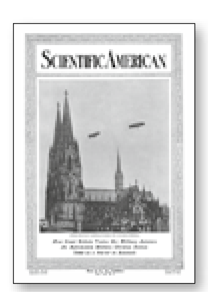
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Septiembre 1964

Cuantos espaciales

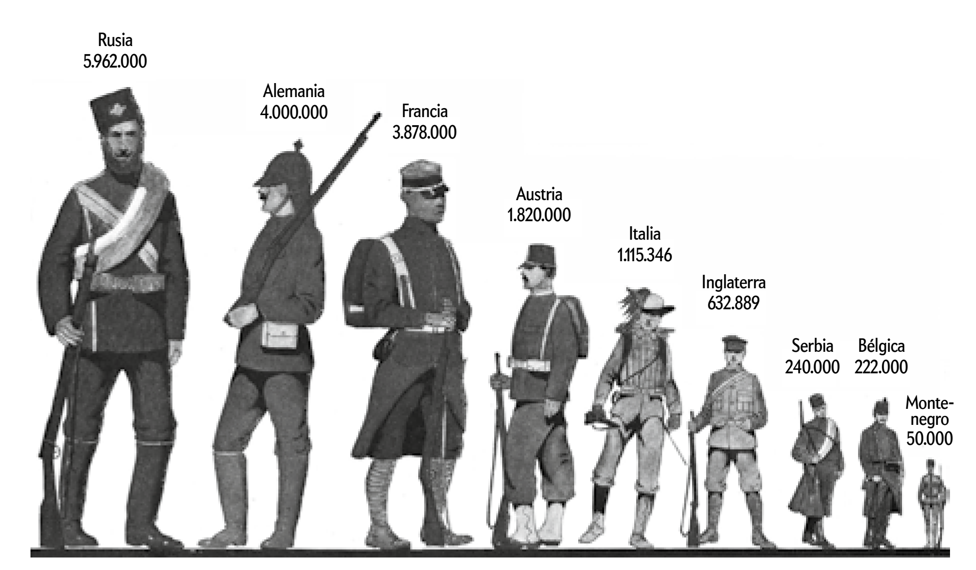
«En la teoría de la relatividad, uno de los dos avances científicos más importantes de este siglo (el otro es la teoría cuántica), el efecto gravitatorio de la materia densa se reduce a geometría. Al igual que la geometría de una región montañosa requiere una fórmula de distancia que varía de un lugar a otro para representar el contorno cambiante del terreno, así la geometría de Einstein posee una fórmula de distancia variable para representar las diferentes masas que hay en el espacio. La materia determina la geometría y, como resultado, esta última responde de fenómenos hasta ahora atribuidos a la gravitación. La geometría ha engullido una parte de la realidad, y puede que lo haga del todo. Hoy, en la mecánica cuántica los físicos pugnan por resolver las propiedades ondulatorias y corpusculares, aparentemente contradictorias, de la materia subatómica, y tal vez deban deducir ambas a partir de cuantos espaciales. Acaso la materia misma se disuelva en el puro espacio. —Morris Kane»



Septiembre 1914

La Gran Guerra

«Para apreciar la formidable naturaleza de la Guerra de las Naciones, ahora en pleno apogeo en el continente europeo, hemos de tener presentes dos hechos: primero, que es una lucha a muerte; segundo, que para alcanzar unos resultados que se quieren definitivos, cada uno de los países contendientes ya ha llamado a filas a todos sus reservistas o ha manifestado su intención de hacerlo, lo que supone dieciséis millones de hombres en armas. En interés de la humanidad, es mejor que los países que sufran una derrota absoluta se den cuenta de que se trata de un veredicto inapelable.»



ESCALA DE LA FUERZA MILITAR de los ejércitos europeos, 1914.

Otra visión de la guerra

«Hoy en día la gente es muy suspicaz en torno a las guerras. Uno se pregunta incluso si el patriotismo no será algo más bien estúpido. Uno siente la emoción prístina; hay ondear de banderas, resonar de trompetas, las gloriosas tradiciones patrias, y luego esa vaga aunque persistente visión de un gordo financiero, de ojos pequeños, redondos y brillantes que acecha al fondo. Tantas veces nos han vendido que uno se torna desconfiado. Uno lucharía incondicionalmente en una guerra por el final de las guerras, pero no en ninguna otra, cualquiera que sea.»

Una luna de Júpiter

«Nos llega un comunicado de mucho interés en un telegrama del profesor Tucker, actualmente director interino del Observatorio Lick. El 21 de julio, el señor Nicholson fotografió desde el observatorio un objeto tenue próximo a Júpiter y cerca del octavo satélite, pero más tenue. Se han logrado más observaciones del objeto y, según el telegrama, el cálculo de la órbita del recién descubierto cuerpo demuestra que se trata de un satélite del gigantesco planeta, el noveno que se ha descrito. Pero ese diminuto cuerpo es tan tenue que debe de hallarse cerca, si no más allá, del límite de visibilidad de los telescopios más potentes, y solo puede distinguirse fotográficamente.»

En 1975, la novena de las 67 lunas de Júpiter conocidas recibió el nombre de Sinope.



Septiembre 1864

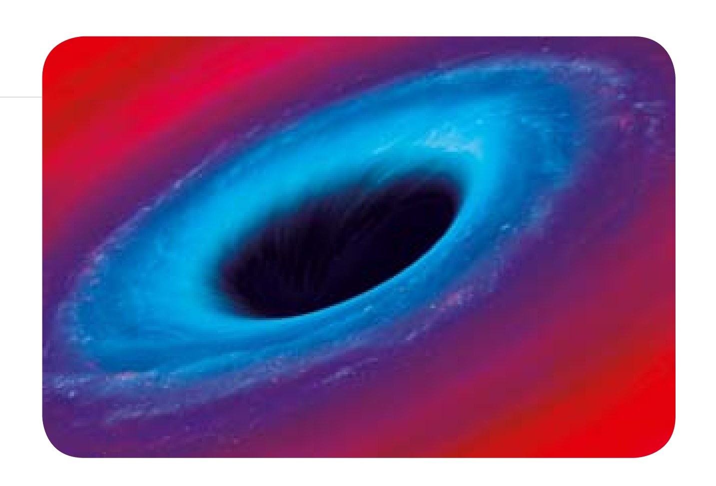
Abajo las tareas domésticas

«Cuando Charles Dickens escribió *La casa desolada* creó un personaje destacado, la señora Jellaby. La dama tenía una misión. Debía cuidar de unos distantes paganos, y los atendía hasta tal extremo que sus propios hijos andaban en harapos y su casa estaba sumida en el desorden. Ello no era sino la simple consecuencia de haber descuidado sus deberes. Pero si la misma celebridad literaria volviera a visitar este país y escribiera sobre damas con obligaciones, encontraría un estado de cosas muy diferente que plasmar por escrito. Véase lo que las sencillas máquinas domésticas han hecho por la sociedad. Años atrás, el ama de casa se sentaba al atardecer y se aplicaba a la aguja tras haber finalizado las labores más pesadas del día. La pila de ropa que se alzaba ante sus fatigados ojos quizá la abrumaría. Hoy ya no es así.»

Rareza salmonera

«El primer salmón pescado en el río Connecticut en cuarenta años se capturó el otro día en Chicopee, y fue servido en Massasoit House, en Springfield (Massachusetts).»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXI, N.º 10, 5 DE SEPTIEMBRE DE 1914

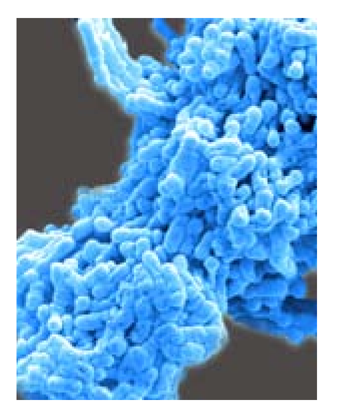


COSMOLOGÍA

El agujero negro primigenio

Niayesh Afshordi, Robert B. Mann y Razieh Pourhasan

La gran explosión, y el universo que nació de ella, podría deberse a la creación de un agujero negro en otra dimensión.



MEDICINA

Nuevas vacunas contra la tuberculosis

Jesús Gonzalo-Asensio, Nacho Aguiló y Carlos Martín

Ante el resurgimiento e imparable avance de la enfermedad, la comunidad científica está realizando un enorme esfuerzo para obtener nuevas vacunas que eviten su propagación.

GENÉTICA

Un nuevo tipo de herencia

Michael K. Skinner

Los contaminantes, el estrés y otros factores pueden alterar de forma permanente la regulación de los genes sin tener que cambiar su código. Parece que algunas de estas modificaciones epigenéticas se transmiten a las generaciones futuras.



MATEMÁTICAS

¡Que siga el juego!

Colm Mulcahy y Dana Richards

En el centenario de su nacimiento, Martin Gardner, el genial autor de la sección «Juegos matemáticos», sigue inspirando a los amantes de los rompecabezas.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Metano y temperatura*; Juan Pedro Adrados: *La minería de textos científicos aporta pistas sobre el potencial innovador de las investigaciones y La era de la informática universal*; Javier Grande: *Las burbujas gigantes de la Vía Láctea*; Marián Beltrán: *Organización política y social en Teotihuacán*; Pere Puigdomènech: *Frutas y verduras más sabrosas*; Fabio Teixidó: *Una vida dedicada a la turbulencia*; José Óscar Hernández Sendín: *Reutilización de aguas residuales*; Sara Arganda: *Geografía genética del cerebro*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *Foro científico*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España